ÜBER

ELASTICITÄT UND FESTIGKEIT

DER

MENSCHLICHEN KNOCHEN.

VON

Dr. OTTO MESSERER,

I. ASSISTENT DER CHIRURGISCHEN KLINIK IN MÜNCHEN.

MIT XVI LITHOGRAPHIRTEN TAFELN UND EINEM HOLZSCHNITTE.

STUTTGART.

VERLAG DER J. G. COTTA'SCHEN BUCHHANDLUNG.

1880.

Druck von Gebrüder Kröner in Stuttgart.

DEM HOCHWOHLGEBORNEN

HERRN GENERALSTABSARZTE UND UNIVERSITÄTSPROFESSOR etc. etc.

Dr. JOH. NEP. RITTER von NUSSBAUM

ZUM

FÜNFUNDZWANZIGJÄHRIGEN DOCTORJUBILÄUM

HOCHACHTUNGSVOLLST DARGEBRACHT.

Digitized by the Internet Archive
in 2016

https://archive.org/details/b22393201

Inhaltsverzeichniss.

Seite

Einleitung 1
Grundbegriffe über Elasticität und Festigkeit 3
Elasticität und Festigkeit der Knochensubstanz 4
Elasticität und Festigkeit der Knochen (eigene Versuche) 5
Die Werder'sche Festigkeitsmaschine 6. 9. 36. 47
I. Schädel 7
1) Druck auf den Schädel zwischen zwei ebenen Flächen in querer und in sagittaler Richtung 9
2) Druck vermittelst der Wirbelsäule in senkrechter Richtung auf den Schädel 26
3) Concentrirter Druck an verschiedenen Stellen des Schädels mittelst eines Druckbolzens 27
II. Unterkiefer 29
1) Seitlicher Druck auf die Kieferwände 29
2) Längsdruck von der Kinnspitze gegen die Gelenkfortsätze 30
III. Wirbel 31
IV. Thorax 33
V. Becken 33
1) Druck in der Richtung von vornen nach hinten. Symphysis pubis zum Kreuzbeine 34
2) Druck in querer Richtung an der Crista ossis ilei angreifend 34
3) Druck in querer Richtung in der Höhe der Acetabula 34
VI. Extremitäten 36
1) Zugfestigkeit 36
2) Druck- und Strebfestigkeit 37
a) Druck auf die Mitte langer Röhrenknochen 37
b) Zerknickung 37
c) Druck in der Richtung des Oberschenkelhalses 45
d) Patella 46
3) Biegungselasticität und Festigkeit 46
Apparat für Biegung durch directe Belastung 48
Knochenfestigkeit in verschiedenen Lebensaltern 69
4) Torsionselasticität und Festigkeit 72
Torsionsapparat 72
Verhältniss der Festigkeit zwischen rechts und links 86
Knochenfestigkeit bei den beiden Geschlechtern 86
Festigkeit des lebenden und todten Knochens und Einfluss der Weichtheile 87
Resultate 89
Erklärung der Abbildungen 97

Dr. med. Otto Messerer

Elasticität und Festigkeit der Knochen.

Einleitung.

Τὰ μὲν ὀστέα τῷ σώματι εἶδος, καὶ ὀρθότητα, καὶ στερεότητα παρέχουσιν.

Valentin sagt in seinem bereits im Jahre 1847 erschienenen Lehrbuche der Physiologie: „Der Mangel an Untersuchungen über die Festigkeitsverhältnisse der Knochen bildet eine wesentliche Lücke der Physiologie und selbst der Chirurgie."

Dieser Mangel blieb aber noch bis in die neueste Zeit. Wir hatten wohl einzelne Angaben, nirgends aber eine eingehende und ausführliche Prüfung der Elasticität und Festigkeit jener stärksten Bestandtheile unseres Körpers.

Erst im Jahre 1876 erschien die exacte und ausgezeichnete Arbeit Rauber's, welcher aus der Compacta und Spongiosa kleine Würfel und Stäbchen schnitt und diese auf ihre Festigkeit und Elasticität untersuchte.

So schön seine Versuche sind, so ist mit ihnen, wie ich glaube, die Aufgabe doch noch nicht vollständig gelöst.

Denn da das Material, aus welchem ein Knochen besteht, innerhalb desselben hinsichtlich der Dichtigkeit und der Art des Gefüges vielfach verschieden ist, können nicht ohne weiteres aus der Festigkeit einzelner Knochenstäbchen, aus der Festigkeit des Materials Schlüsse auf den ganzen Knochen gemacht werden.

Solche Folgerungen sind um so schwerer zu ziehen, als sich vielfach die Form unserer Knochen, ich erinnere besonders an den Schädel und das Becken, geradezu jeder Berechnung entzieht.

Aber was uns doch vornehmlich interessirt, ist die Festigkeit des ganzen Knochens und zur Erkenntniss dieser bleibt uns aus obigen Gründen nichts anderes übrig als eine directe Prüfung.

Mein Ziel war daher, die hauptsächlichsten menschlichen Knochen, wie sie sind und soweit sie sich überhaupt für den Versuch eigneten, auf ihre Tragfähigkeit bei den möglichen Beanspruchungen auf Zug, Druck, Zerknickung, Biegung und Verwindung zu untersuchen und auch die Veränderungen, die sich bis zum Bruche zeigen, festzustellen.

Dabei sollte der Einfluss des Alters, der Körperseite und des Geschlechtes berücksichtigt werden.

Indem es mir klar war, dass eine solche Arbeit, in der auf Berechnung grossentheils verzichtet werden muss, nur dann einigen Werth besitzen kann, wenn sie ein grosses Untersuchungsmaterial zum Gegenstande hat, suchte ich die Prüfungen an möglichst vielen Knochen zu machen, und durch die Güte meines verehrten

Chefs, des Herrn Professors von Nussbaum war es mir ermöglicht, 500 Knochen resp. Knochencombinationen (Schädel, Thorax, Becken nur einmal gezählt) von 90 Leichen in dieser Hinsicht zu untersuchen.

Von Herrn Professor Rüdinger erhielt ich die Anregung zu der Arbeit.

Dieselbe wurde zum Theile in der anatomischen Anstalt, zum grössten Theile im mechanisch-technischen Laboratorium des hiesigen Polytechnikums gemacht, wo mir durch die nicht hoch genug zu rühmende Liberalität des Herrn Professors Bauschinger die Benützung der Werder'schen Festigkeitsmaschine unter Respicienz seines Assistenten, Herrn Klebe gestattet worden war.

Herr Klebe unterstützte mich in der liebenswürdigsten Weise durch Rath und That, und ihm verdanke ich auch die Ausrechnung der Biegungs- sowie Torsionsfestigkeit und Elasticität.

Allen genannten Herren sage ich nochmals an dieser Stelle meinen aufrichtigsten Dank.

Grundbegriffe über Elasticität und Festigkeit.

Um Wiederholungen und Einschaltungen zu vermeiden, sollen hier kurz einige Bemerkungen über Elasticität und Festigkeit gemacht werden, soweit dieselben für das Verständniss des Nachstehenden nöthig sind.

Bei Einwirkung einer äusseren Gewalt auf einen Körper werden seine Theile in ihrer gegenseitigen Lage verschoben. Blieb die Einwirkung innerhalb gewisser Grenzen, so nimmt nach dem Aufhören derselben der Körper seine ursprüngliche Gestalt wieder an.

Diese Fähigkeit der Körper, nach einer Gestaltsveränderung durch äussere Einwirkung die alte Form wieder annehmen zu können, nennt man Elasticität, und die Grenze, innerhalb welcher diess möglich ist, Elasticitätsgrenze.

Wird letztere überschritten, so erhält der Körper eine neue Gestalt, die auch noch bleibt, wenn die einwirkende Gewalt beseitigt wird. Jener Theil der Formveränderung, welcher alsdann nach Beseitigung der Belastung wieder verschwindet, heisst die elastische Veränderung, während der zurückbleibende Theil die bleibende oder permanente Formveränderung genannt wird.

Die einwirkende Gewalt kann endlich so gross werden, dass der Zusammenhang des Körpers vollständig aufgehoben, dass seine Festigkeit überschritten wird. Festigkeit ist also der Widerstand, welchen ein Körper der Trennung seiner Theile entgegensetzt.

Je nach der Art der Belastung und der durch dieselbe erzielten Formveränderung unterscheidet man mehrere Arten der Festigkeit und Elasticität.

Unter Zug-, absoluter, Zerreissungselasticität und Festigkeit versteht man den Widerstand, welchen ein Körper dem Zerreissen seiner Fasern entgegensetzt.

Druck- oder rückwirkende Elasticität und Festigkeit ist der Widerstand eines Körpers gegen das Zusammenpressen seiner Theile.

Auf relative oder Biegungselasticität und Festigkeit wird ein Körper beansprucht, wenn die Kraft senkrecht zu seiner Längsrichtung wirkend, ihn zu zerbrechen sucht, wie z. B. bei einem von oben belasteten und an dem einen Ende festgehaltenen horizontal liegenden Balken oder wie bei einem Stabe, den man über das Knie abbricht.

Zerdrehungs- oder Torsionselasticität und Festigkeit ist der Widerstand, welchen ein Körper der Wirkung einer seitlichen Kraft entgegenstellt, die ihn abzudrehen oder abzuwürgen sucht.

Uebertrifft bei einem Körper, bei welchem die Kraft in der Richtung der Längsachse zusammendrückend wirkt, die Querschnittsdimension die Länge um mehr als das Dreifache, so ist der Körper zugleich seitlichen Ausbiegungen ausgesetzt und wird in diesem Falle auf Zerknickungs-, Säulen- oder Strebfestigkeit

und Elasticität beansprucht; hiebei nimmt mit der wachsenden Länge des Stabes die Ausbiegung zu, und vermindert sich in entsprechendem Verhältnisse die Tragfähigkeit.

Um bei verschiedenen Körpern die Elasticität und Festigkeit vergleichen zu können, bezieht man dieselbe auf die Einheit, auf einen Elasticitäts- und Festigkeitsmodul.

Die Kraft, bei welcher ein Körper vom Querschnitte Eins zertrennt wird, nennt man den Modul der Festigkeit.

Für den Verlauf der elastischen Veränderung sind die Erfahrungssätze massgebend, wornach bei einem Körper die Dehnung, Verkürzung oder Verwindung proportional den belastenden Gewichten zunimmt, ferner proportional der Länge des Körpers ist und umgekehrt proportional der Querschnittsgrösse desselben.

Der Elasticitätsmodul, eine hypothetische Grösse, fusst auf den vorstehenden Sätzen und wird durch das Gewicht ausgedrückt, welches einen Körper vom Querschnitte Eins um seine Länge ausdehnen beziehungsweise verkürzen würde, wenn eine solche elastische Veränderung physikalisch möglich wäre. Für Torsion bezeichnet unter gleicher Voraussetzung der Elasticitätsmodul dasjenige Moment (Kraft mal Länge des Torsionshebels), welches einen Körper vom Querschnitte Eins um 360° verdrehen würde.

Elasticität und Festigkeit der Knochensubstanz.

Die früheren Forscher auf diesem Gebiete Musschenbrock[1], Bevaw[2] und Wertheim[3] hatten nur die Zugfestigkeit und Elasticität berücksichtigt. Wertheim fand die absolute Festigkeit zwischen 3,3 und 15,03 kg pro qmm und den Elasticitätsmodul für Zug zwischen 1819 und 2710 kg pro qmm Querschnitt betragend.

Erst Rauber[4] dehnte seine Untersuchungen an kleinen aus der Compacta und Spongiosa geschnittenen Würfeln und Stäbchen auch auf die übrigen Festigkeitsarten aus.

Seinen Ergebnissen entnehme ich Folgendes:

Die absolute Festigkeit der frischen, normal warmen menschlichen Compacta im mittleren Alter schwankt zwischen 9,25 und 12,41 kg für den qmm; die rückwirkende zwischen 12,56 und 16,8 kg pro qmm. Die rückwirkende Festigkeit übertrifft also die absolute. Letztere steht der des Messings nahe, erstere übertrifft die von Holz, Blei, Granit etwa um das Doppelte.

Austrocknung vermehrt, Erwärmung vermindert die Festigkeit. Im Alter nimmt die absolute Festigkeit mehr ab als die rückwirkende.

Frische Spongiosa eines menschlichen Lendenwirbels hatte 0,84, des Oberschenkelknorrens 0,96 kg pro qmm rückwirkende Festigkeit.

Die zur Längsachse der Röhrenknochen parallele Druckrichtung ergab den höchsten Festigkeitsmodul; die mit beiden Horizontalachsen parallele, den Faserverlauf senkrecht treffende Druckrichtung ergab niedrigere aber unter sich nicht abweichende Werthe.

---

[1] Introductio ad philosophiam naturalem. T. I. Lugd. Bat. 1762.

[2] Valentin, Lehrbuch der Physiologie des Menschen. 2. Aufl. Bd. I, S. 34.

[3] Annales de chimie et physique 1847.

[4] Elasticität und Festigkeit der Knochen. Leipzig 1876.

Bei seinen Biegungsversuchen fand Rauber den Elasticitätsmodul der frischen, warmen Compacta des Oberschenkelbeines eines 46jährigen Mannes zwischen 1982—2099, des Schienbeines zwischen 1871—2041 kg pro qmm betragend. Der Elasticitätsmodul des Knochens ist der doppelte des Holzes und ein Drittel desjenigen des Messings. Trocknung und Erkältung erhöht den Elasticitätsmodul.

Biegungen nach den Querachsen oberflächlicher oder tiefer gelegener Substanz verschiedener menschlicher Knochen zeigen keine constanten Unterschiede unter sich.

Die Durchbiegungen sind den Belastungen proportional bis jenseits der Elasticitätsgrenze, welche durch eine Belastung, die zwischen dem ersten und zweiten Viertel des Bruchgewichtes liegt, erreicht wird.

Längere Dauer einer Belastung wirkt einem höheren Gewichte gleich.

Die Torsionsfestigkeit der Compacta betrug im Mittel aus 4 Versuchen 8, im höchsten Falle 9,307 kg pro qmm.

Die Strebfestigkeit eines Parallelepipedes von 45 mm Länge, quadratischem Querschnitte von 3 mm Seite aus dem Oberschenkelbeine eines 33jährigen Mannes betrug im Mittel 108 kg; die rückwirkende Festigkeit von Würfeln desselben Knochens von 3 mm Kante war 150 kg. Die Stäbchen ertrugen also bei fünfzehnmaliger Länge gegen ein Viertel weniger Gewicht als die Würfel.

Elasticität und Festigkeit der Knochen.

So werthvoll und interessant an sich für das Verständniss des Knochenbaues die eben aufgeführten Angaben Rauber's sind, so ist man, wie leicht einzusehen, mit denselben doch absolut nicht im Stande, z. B. die Strebfestigkeit eines Oberschenkels zu berechnen. Es haben daher directe in dieser Beziehung angestellte Prüfungen ihre volle Berechtigung.

Indem ich nachstehend meine eigenen Versuche bringe, werde ich die wenigen von Anderen an ganzen Knochen angestellten Untersuchungen bei den zugehörigen Abschnitten anführen.

Die von mir geprüften Knochen waren jedesmal völlig frisch, kurz vorher aus der Leiche geschnitten und der Weichtheile entblösst verwendet worden; ausserdem blieb meistentheils das Periost, da es der Austrocknung des Knochens während des Versuchs entgegenwirkte, belassen. Die kurze Zeit von der Auslösung aus der Leiche bis zum Versuche wurden die Knochen gleichfalls zur Verhinderung von Wasserverlust in feuchte Tücher oder in Fleischstücke eingeschlagen.

Die Temperatur bei den Versuchen war die gewöhnliche Zimmertemperatur im Sommer, also circa 20—25° C.

Wo eine Wahl möglich war, waren nur Personen mit kurzer Krankheitsdauer, jedesmal und sorgfältig aber nur Leichen ausgesucht worden, bei welchen die Knochen völlig normal und gesund erschienen und durch keine frühere Knochenkrankheit alterirt.

Als Festigkeitsmaschine diente in den meisten Fällen die im hiesigen Polytechnikum befindliche Werder'sche Prüfungsmaschine.

Die Werder'sche Festigkeitsmaschine.

Bei dieser Maschine wird die Kraft mittelst einer hydraulischen Presse ausgeübt und mit einer genau controlirbaren Hebelwage gemessen.

Da es von Interesse sein dürfte, die Werder'sche Maschine, welche unter den bekannten Festigkeitsmaschinen sowohl hinsichtlich der Genauigkeit der Angaben als auch der Bequemlichkeit der Handhabung unzweifelhaft den ersten Rang einnimmt, näher zu betrachten, so lasse ich im Nachstehenden eine kurze Beschreibung derselben folgen [1].

Auf Taf. I finden sich die wesentlichen Theile der Maschine sowie die Vorrichtung, welche in den meisten Fällen für die Prüfung auf Druck- und Strebfestigkeit diente. abgebildet.

A ist der Presscylinder der hydraulischen Presse. Wird in denselben Wasser eingepumpt, so bewegt sich der Presskolben B in der Richtung von links nach rechts. Dieses Einpumpen geschieht durch zwei Druckpumpen D, die das Wasser mittelst zweier Schläuche aus dem untergestellten Wasserbehälter E entnehmen und durch ein Verbindungsrohr F in den Presscylinder drücken. G sind die beiden Hebel, mit welchen ein Mann das Einpumpen besorgt. Presscylinder und Pumpvorrichtung sitzen an dem festen Gestelle H der Maschine.

An dem Presskolben der hydraulischen Presse befinden sich zwei Aufsatzstücke $L\,L$, welche den Querarm K tragen. An diesem ist der grosse Uförmige Wagbalken C sammt seinem Arme M und der Wagschale N in den Schneiden I frei aufgehängt.

Die vom Presskolben ausgeübte Kraft wird durch eine bei r liegende Schneide von dem Wagbalken C aufgenommen und von diesem wieder mittelst zweier seitlich bei $e\,e$ liegender ebensolcher Schneiden auf die durch Schlitze im Wagbalken frei hindurchgehenden Joche O, die Zugstangen $P\,P$ und das Querstück R übertragen.

Die Joche $O\,O$ mitsammt dem Querstücke R und den Zugstangen $P\,P$ stellen ein Doppelparallelogramm dar, welches bei $S\,S$ an dem Querarme K und bei T an einem mit dem Presskolben verbundenen Schlitten U frei aufgehängt ist. Durch diese Anordnung ist beim Vorwärtsgehen von R jede Reibung ausgeschlossen.

Vom Querstücke R wird in jedem Falle für die verschiedenen Festigkeitsproben die Kraft entnommen; das Abwiegen der übertragenen Kraft wird auf folgende Weise ermöglicht: Die mittlere Schneide r des Wagbalkens C liegt etwas tiefer als die beiden äusseren, in einer geraden Linie liegenden Schneidenpaare $e\,e$ und $I\,I$. Hiedurch wird bei jeder Uebertragung der Kraft der Arm M des Wagbalkens zu heben gesucht, welchem Bestreben durch Gewichte, die auf die Wagschale N aufgelegt werden, entgegengetreten wird.

Dabei bildet der Wagbalken einen Winkelhebel, dessen einer Arm die Entfernung der mittleren Schneide r von der geraden Linie ist, in welcher die oben genannten seitlichen Schneidenpaare $e\,e\;I\,I$ liegen, während der andere Hebelarm eine Länge hat gleich der Entfernung der Schneide r vom Aufhängungspunkte der Wagschale N. Das Verhältniss dieser beiden Hebelarme ist 1 : 500.

Eine auf den Wagbalken C aufgeschraubte, sehr empfindliche Libelle zeigt an, ob der Gleichgewichtszustand der Wage erreicht ist, und die auf N aufgelegten Gewichte der ausgeübten Kraft entsprechen.

Die Richtigkeit des Hebelverhältnisses der Wage $C\,M\,N$ wird wieder durch Abwiegen controlirt und zwar mittelst einer bei Y aufgehängten Hebelwage, deren Hebel 1 : 10 übersetzt sind.

---

[1] Ausführliche Abbildung und Beschreibung findet sich in Kronauer's Zeichnungen von Maschinen etc. Bd. 4, Lief. 7—8, ferner in Bauschinger, Essais de Résistance etc. Vienne 1878.

Das Rad *W* dient dazu, nach jedem Versuche den Presskolben wieder in den Presscylinder zurückzuführen. Dabei läuft das überflüssige Wasser aus dem Presscylinder durch das Rohr *Z* in den Wasserbehälter E zurück.

In der auf Taf. I abgebildeten Zusammenstellung wurde, wie Eingangs erwähnt, die Maschine in den meisten Fällen für die Prüfung auf Druck- und Strebfestigkeit benützt, indem ein zwischen dem Querstücke *R* und der senkrechten Wand des Presscylinders befindlicher Körper wie z. B. in der Figur der Knochen *a* beim Vorwärtsgehen des Querstückes *R* einen Druck erleidet.

Bei Prüfung auf Zug- und Biegungsfestigkeit dienten die von dem festen Gestelle *H* der Maschine nach links zu fortlaufenden (in der Figur nur angedeuteten) Schienen *m* zur Anbringung der weiteren noch nöthigen Geräthschaften.

Die Werder'sche Maschine ist eigentlich nur zur Prüfung der Baumaterialien und somit für viel bedeutendere Belastungen, als sie bei den Knochen erforderlich werden, bestimmt.

Obwohl man aber mit ihr ganz ungeheuere Kraftleistungen auszuüben und zu messen im Stande ist, zeigt sie auch ganz kleine Festigkeitsunterschiede mit absoluter Genauigkeit an. Belastungsdifferenzen von 5 kg werden mit vollständiger Sicherheit unterschieden und selbst Belastungen von 1 kg bewirken noch an der Libelle des Wagbalkens einen sichtbaren Ausschlag.

Die Benützung dieser Maschine zu Knochenfestigkeitsversuchen ist also vollständig gerechtfertigt, zumal bei denselben Belastungen bis zu 4000 kg in Anwendung kamen.

Ausserdem muss ich betonen, dass die Richtigkeit der Maschine vor jeder Versuchsreihe controlirt wurde.

Waren bei einzelnen schwachen Knochen wie z. B. der Fibula sehr geringe Belastungen nothwendig, so wurde zur Prüfung nicht die Werder'sche Festigkeitsmaschine benützt, sondern die directe Belastung mittelst Anhängen von Gewichten angewendet.

Hier konnte ich mich recht wohl überzeugen, dass diese Methode nur bei ganz schwachen Knochen ausführbar ist. Schon bei einer Belastung von 120 kg gerieth ich fast in Verlegenheit, die Gewichte alle auf die Wagschale zu bringen, ganz abgesehen davon, dass das fortwährende Aufladen der Gewichte höchst lästig und zeitraubend war.

Für die Versuche über die Torsionsfestigkeit der langen Röhrenknochen endlich waren die Vorrichtungen der Werder'schen Maschine zu massig und nicht passend, daher für diese Versuche ein eigens zusammengestellter Torsionsapparat benützt wurde.

I. Schädel.

Ueber die Elasticität des Schädels existiren schon mehrfache Versuche. Die ersten wurden von Bruns[1] in der Weise angestellt, dass er den unverletzten, noch mit den Weichtheilen überkleideten Kopf zwischen zwei kleinen Brettern in einem Schraubstocke befestigte und durch Zudrehen des Schraubstockes den Schädel entweder in sagittaler oder in querer Richtung zusammendrückte. An vier Stellen, am Hinterhaupt, der Stirne, sowie über beiden Parietalbeinen wurde an einer kleinen Stelle der Knochen entblösst und eine Marke angegeben, auf welche getastert und so die Veränderung in der Länge und Quere nach je ein paar Schraubenumdrehungen gemessen werden konnte.

---

[1] Die chirurgischen Krankheiten und Verletzungen des Gehirns und seiner Umhüllungen. Tübingen 1854.

Bruns fand hiebei, dass der Schädel in einer beliebigen Richtung beträchtlich zusammengedrückt werden kann, ohne dass ein Bruch eintritt, und dass bei Verkleinerung des Schädels in einer Richtung eine Vergrösserung in den übrigen Richtungen stattfinde. Die senkrechte Vergrösserung wurde nicht gemessen, sondern nur „aus der sichtlich zunehmenden grösseren Wölbung des Scheitels“ erschlossen.

In einem Falle war bei Zusammendrückung im Längsdurchmesser die Verkleinerung desselben bis zum Bruche 11 mm und dem entsprechend die Vergrösserung des queren Durchmessers 5 mm. In einem anderen Falle fand bei seitlicher Zusammendrückung eine Verkleinerung des queren Durchmessers um 15 mm statt und die Verlängerung des sagittalen Durchmessers war 8 mm. Als hier bei der Querverkürzung um 13 mm der Schädel entlastet wurde, bestand eine bleibende Veränderung von 2 mm.

Diese Schraubstockversuche von Bruns, nach welchen die Elasticität des Schädels allgemein als sehr bedeutend angesehen wurde, erfuhren durch Baum[1] eine Wiederholung und dieser kam zu entschieden anderen Resultaten.

Baum modificirte das Verfahren in der Weise, dass er den Schädel für den Versuch von den bedeckenden Weichtheilen entblösste und dann nicht in einem Schraubstocke, sondern in einem eisernen Ringe befestigte, welcher an zwei gegenüberliegenden Stellen je eine Pelotte trug, die eine fest, die andere beweglich zur Ausübung des Druckes.

Ganz richtig bemerkt Baum, dass die Weichtheile sicher nicht von Einfluss auf den Ausfall des Experimentes sind, und dass bei Belassung derselben zu leicht Sprünge und kleine Risse am Schädel übersehen werden.

Mit seinem Apparate stellte Baum Versuche an drei Schädeln an.

Bei Zusammendrückung im Querdurchmesser wurde in einem Falle eine Verkleinerung dieses Durchmessers um 10 mm, ein zweites Mal um 7,5 mm bis zum Bruche beobachtet.

Bei Zusammendrückung im Längsdurchmesser eine Verkürzung desselben um 10 mm.

Dabei blieben die beiden senkrecht auf dem gedrückten Durchmesser stehenden Richtungen völlig unverändert.

Dass der Schädel überhaupt elastisch ist, erschloss Hyrtl[2] daraus, dass ein im frischen Zustande auf den Boden geschleuderter Kopf wie ein elastischer Ballen mehrere Sätze macht. Félicet[3] liess geschwärzte Schädel auf eine weisse Fläche aus verschiedener Höhe fallen und fand bald eine runde, bald eine ovale geschwärzte Figur wie bei dem gleichen Experimente mit einer Elfenbeinkugel.

Die Elasticität des Schädels, glaube ich, ist nicht fraglich. Denn abgesehen davon, dass die Knochensubstanz schon als solche elastisch ist, setzt die Form, in welcher sie am Schädel verwendet wurde, die Elasticität dieses Hohlgebildes ausser Zweifel, und es handelt sich nur um die Grösse und Vollkommenheit der Schädelelasticität.

Ich will noch erwähnen, dass an den Schädeln neugeborener Kinder zur Prüfung der Zangenwirkung von Cohnstein[4] gleichfalls Experimente angestellt wurden. Er fand, dass der den comprimirten Schädeldurchmesser senkrecht treffende bald unverändert blieb, bald sich verkürzte, bald verlängerte.

Selbstverständlich sind die Verhältnisse an dem zum Theile häutigen Kinderschädel durchaus andere als beim geschlossenen und festen Schädelgehäuse der Erwachsenen, und lassen sich beide in Bezug auf Compression und deren Wirkungen durchaus nicht vergleichen.

Ueber die Festigkeit des Schädels macht, so viel ich weiss, nur C. O. Weber[5] ein paar Angaben,

---

[1] Archiv für klin. Chirurgie 1876. Bd. XIX, p. 381.

[2] Topographische Anatomie 1857. Bd. I, S. 68.

[3] Recherches anatomiques et expérimentales sur les fractures du crâne. Thèse de Paris 1873.

[4] Ueber Zangenapplication bei Beckenenge. Virchow's Archiv, 64. Bd., p. 82.

[5] Chirurgische Erfahrungen und Untersuchungen etc. Berlin 1859.

wornach der Schädel eines gracilen, phthisischen 27jährigen Mädchens durch eine Belastung von 507 kg zum Bruche kam, während bei einem 37jährigen, robusten Weibe durch eine Belastung von 625 kg ein Bruch noch nicht herbeigeführt werden konnte.

Nachstehend die eigenen Versuche.

1) Druck auf den Schädel zwischen zwei ebenen Flächen in querer und in sagittaler Richtung.

Da in dem für Druckversuche bestimmten Theile der Werder'schen Maschine (Taf. I) nicht genügend Raum für die verwendeten Messapparate vorhanden gewesen wäre, so wurde der Schädel in einem anderen Theile der Maschine geprüft, welcher auch bei den Biegungsversuchen benützt wurde.

Auf Taf. III Fig. 1 findet sich die zugehörige Zeichnung. *H* ist das feste Gestelle der Maschine, von welchem nach links zu die Schienen *m m* weggehen. Auf diesen liegt der grosse, gusseiserne Balken *C*, der zwei durch eine senkrecht gestellte Metallplatte *b* mit einander in Verbindung gebrachte Streben *d d* trägt. Gegen diese feststehenden Theile wird durch die Zugstangen *B B* der auf den Schienen bewegliche Wagen *A* mit nach rechts sehender breiter Stirnfläche gezogen. Die Zugstangen sind an das Querstück (*R* auf Taf. I) der Maschine festgemacht, von welchem, wie schon gesagt, bei den verschiedenen Festigkeitsproben die Kraft entnommen wird.

Die Beanspruchung des Schädels auf Druck geschah also zwischen der senkrechten Wand des Wagens *A* und der senkrechten Platte *b*.

Bei der Bewegung des Wagens auf den Schienen findet natürlich eine geringe Reibung statt, welche einen Fehler in der Kraftabwägung geben würde. Dieser Fehler wurde jedoch durch Auflegen eines kleinen, der Reibungsgrösse entsprechenden Gewichtes auf die Wagschale der Wägevorrichtung (*N* auf Taf. I) eliminirt.

Die zu den Versuchen benützten, völlig frischen Schädel waren von den äusseren Weichtheilen entblösst worden; die Steigerung der Belastung geschah beim Beginne der Prüfung mit 50 zu 50 kg, nahe dem Bruche jedoch mit kleineren Gewichten. Nach je 50 oder 100 kg Belastung wurden die Veränderungen am Schädel mit den Messapparaten festgestellt.

a) Druck in querer Richtung.

Versuch 1. Schädel eines 45jährigen Weibes.

Auf beiden Parietalbeinen, auf der Stirne und dem Hinterhaupte, sowie auf der Scheitelhöhe und am vorderen Rande des Foramen magnum wurden Marken angebracht, auf welche die Spitzen des Tastercirkels sicher eingesetzt werden konnten. Während die Druckplatten und somit auch die äussersten gedrückten Stellen des Schädels bei Beginn des Versuchs einen Abstand von 14 cm hatten, waren die für die Querdimension angebrachten Marken auf beiden Parietalbeinen nur 11 cm von einander entfernt; zwischen der äussersten gedrückten Partie und der Marke für die Messung bestand also beiderseits noch ein Zwischenraum von 1,5 cm.

So war die Abmessung in querer, sagittaler und senkrechter Richtung vorgenommen worden, aber der Druck konnte fort und fort gesteigert werden, ohne dass sich weder durch die Messung noch mit dem Auge irgend eine Veränderung am Schädel erkennen liess.

Bei der Belastung von 500 kg erfolgte mehrmaliges Krachen und satteres Anlegen der linken Seite an die Druckplatte und erst nachdem auf diese Weise ein Bruch eingetreten war, fand sich bei der Messung eine Vergrösserung der sagittalen Dimension um 1 mm, sowie der senkrechten um 2 mm. Die Messstrecke in der Querrichtung zeigte sich unverändert.

Bei Herausnahme des Schädels war auf dem linken Seitenwandbeine eine 3 cm lange Fissur zu sehen.

Der Druck wurde sodann noch weiter bis auf 580 kg fortgesetzt, wobei besonders starkes Krachen eintrat. Die Schlussveränderungen waren: Messstrecke in querer Richtung eine Verkleinerung von 2,5 mm, in sagittaler Richtung eine Verlängerung von 6,5 mm und in senkrechter von 8,5 mm. Nach der Entlastung war die bleibende Veränderung für die quere Messstrecke — 0,3 mm, für die sagittale Dimension + 2 mm, für die senkrechte + 3 mm.

Am Schädel erschien die ganze rechte Seite bis zu einer längs der Linea semicircularis oss. parietalis verlaufenden Fissur eingedrückt. Ausserdem bestand ein grosser Querbruch der Schädelbasis. Der Riss ging vom linken Schläfenbeine über den linken grossen Keilbeinflügel und den Türkensattel, trennte sodann den rechten kleinen Keilbeinflügel vom Stirnbeine ab und endete in einer Diastase der Sutura temporo-parietalis.

Der negative Ausfall des Experimentes bezüglich der Schädelelasticität liess vermuthen, dass die Verkleinerung des Schädels im direct gedrückten Durchmesser vielleicht nur an der den Druckplatten nächstliegenden Schädelpartie geschah, an welcher eine Messung am Schädel selbst nicht statthaben konnte, und dass bei Messung an Punkten, die entfernter von der direct gedrückten Partie lagen, die Veränderung im gedrückten Durchmesser entweder gänzlich, oder doch zum grössten Theile entging.

Die Unmöglichkeit ferner, in den beiden anderen, nicht direct gedrückten Durchmessern irgend eine Veränderung nachweisen zu können, konnte ihren Grund darin haben, dass sich diese Durchmesser, wie Baum annimmt, überhaupt nicht verändern, oder dass die Veränderungen sehr gering und durch einfache Messung mit dem Tastercirkel nicht zu erkennen sind.

Um nun mit möglichster Genauigkeit eine jede, auch sehr kleine Gestaltsveränderung zu ermitteln, wurden die übrigen Schädelversuche in folgender Weise angestellt:

Die Verkürzung in der Druckrichtung war direct aus dem Abstande der beiden Druckplatten vor und während des Versuchs ermittelt, und zu diesem Zwecke der Schädel durch geeignete Unterlagen (auf Fig. 1, Taf. III sind dieselben weggelassen) unterstützt worden, so dass er während des Druckes seine Lage nicht verändern konnte, und die Berührungspunkte an den Druckplatten stets die gleichen blieben. Zwei möglichst nahe den Druckpunkten liegende Marken dienten den Cirkelspitzen als Messpunkte. Ihre Entfernung wurde mit einer Genauigkeit bis zu $^1/_{10}$ mm auf einem Transversalmassstabe abgegriffen.

In einigen Versuchen fand ausserdem noch in der Druckrichtung wie bei Versuch 1 eine Abmessung des Abstandes zweier möglichst weit von einander entfernt auf dem Schädel selbst angebrachter Punkte statt.

Zur Ausmessung der Veränderungen in den beiden senkrecht zur Druckachse stehenden Richtungen kamen zwei Messgabeln in Verwendung, deren Einrichtung aus Fig. 2 auf Taf. III ersichtlich ist.

An einem eisernen Querbande ist der eine der zwei hölzernen Gabelarme festgeschraubt, der andere leicht und sicher beweglich. Die Arme sind an ihrer inneren Seite 14 cm vom Befestigungs- resp. Drehpunkte entfernt mit zwei Stahlspitzen und an ihrer äusseren Seite 70 cm von diesen Punkten mit zwei abgerundeten Marken von Stahl versehen.

Wurden nun die beiden Spitzen an gegenüberliegenden Stellen des Schädels, deren Veränderung ermittelt werden sollte, angelegt, so bewegte sich, nachdem die ganze Gabel durch ein Gummiband am Schädel festgehalten war, bei jeder Veränderung des betreffenden Schädeldurchmessers der leicht bewegliche Arm der Messgabel im gleichen Sinne mit.

Da die Entfernung der Stahlspitzen einerseits und der Messmarken andererseits vom Drehpunkte sich wie 1:5 verhielt, wurde jede Veränderung des Schädels an den Messmarken in fünffacher Uebersetzung wiedergegeben und in dieser Grösse mittelst eines Kalibermassstabes abgelesen. (Die Art der Messung siehe Fig. 2, Taf. III.)

Die eine dieser Messgabeln setzte ich immer auf die Scheitelhöhe und den vorderen Rand des Hinterhauptsloches auf, die andere bei Querdruck auf die Stirne und das Hinterhaupt, bei Längsdruck auf die am weitesten von einander abstehenden Punkte der seitlichen Schädelwände. So liess sich jede kleinste Ver-

änderung in den beiden senkrecht zur Druckrichtung stehenden Durchmessern mit einer Genauigkeit bis zu $^2/_{100}$ mm erkennen. Die Versuchsanordnung wird aus Fig. 1, Taf. III klar.

Diese fünffach vergrösserten Abmessungen wurden auf die directen Werthe reducirt in die nachfolgenden Zahlenreihen eingesetzt.

Während eines jeden Versuchs war ausserdem zur Feststellung der bleibenden Veränderungen mehrmals auf die Null-Stellung zurückgekehrt worden.

Der deutlich ausgesprochene Bruch erfolgte meist mit lautem Krachen; sehr oft fand jedoch ziemlich lange vor demselben ein leises Knistergeräusch statt, welches sicher von bereits statthabenden kleinen Continuitätstrennungen herrührte.

Versuch 2. Schädel eines 18jährigen, schlecht entwickelten, kindlich aussehenden Individuums.

Belastung.	Quer- (Druck-) Richtung. Total-Verkleinerung.	Differenz in	Bleibende Verkleinerung.	Längsrichtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Senkrechte Richtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Bemerkung.
kg	mm	$^1/_{100}$ mm	mm	mm	$^1/_{100}$ mm	mm	mm	$^1/_{100}$ mm	mm	
100	1,0	100		0,24	24		0,22	22		
200	1,8	80	0	0,36	12	0	0,28	6	0	
300	3,1	130		0,42	6		0,38	10		
400	4,0	90	1,0	0,64	22	0,14	0,54	16	0,1	Knistern.
500	7,0	300		1,06	42		1,24	70		Knistern.
				dann lauter Krach; nach demselben						
	13,2	620	3,2	4,7	361	1,5	7,5	526	1,0	

Beiderseits hat eine Diastase der Sutura temporo-parietalis und temporo-sphenoidalis stattgefunden; von hier geht gleichfalls beiderseits und symmetrisch ein Querriss durch den grossen Keilbeinflügel auf den Clivus zur Verbindungsstelle des Keil- mit dem Hinterhauptsbeine.

Versuch 3. Schädel eines 19jährigen Mannes.

Belastung.	Quer- (Druck-) Richtung. Total-Verkleinerung.	Differenz in	Bleibende Verkleinerung.	Längsrichtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Senkrechte Richtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.
kg	mm	$^1/_{100}$ mm	mm	mm	$^1/_{100}$ mm	mm	mm	$^1/_{100}$ mm	mm
100	1,0	100		0,08	8		0,04	4	
200	1,9	90		0,18	10		0,10	6	
300	3,4	150	0	0,28	10	0	0,40	30	0
400	6,5	310		0,44	16		1,18	78	
				Knistern und Sinken der Wage:					
	17,0	1050	1,0	4,86	442	1,8	12,64	1146	3,5

Nach Eröffnung des Schädels zeigt sich ein symmetrischer Querriss, welcher auf der oberen Fläche beider Keilbeinpyramiden und über den Clivus verläuft.

Versuch 4. Schädel eines 34jährigen Mannes.

Belastung.	Quer- (Druck-) Richtung. Total-Verkleinerung.	Differenz in	Bleibende Verkleinerung.	Längsrichtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Senkrechte Richtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Bemerkung.
kg	mm	$^1/_{100}$ mm	mm	mm	$^1/_{100}$ mm	mm	mm	$^1/_{100}$ mm	mm	
100	0,6	60		0	0		0,04	4		
200	1,3	70	0	0,04	4	0	0,14	10	0	
300	1,9	60		0,06	2		0,20	6		
400	2,5	60	0,1	0,12	6	0	0,36	16	0,04	
500	3,4	90		0,18	6		0,46	10		Leises Knistern.
				Bei 600 kg Krachen und Bruch, darnach						
	21,5	181	1,0	7,90	772	2,0	12,72	1226	0	

Die Veränderung in der Druckrichtung war ausserdem noch am Schädel selbst gemessen worden. Während die äussersten, gedrückten Partien des Schädels 16,2 cm von einander abstanden, befanden sich die angebrachten Marken in einer Entfernung von 12,2 cm.

Bei 300 kg war die Verkürzung der Messstrecke 0,1 mm
„ 400 „ „ „ „ „ „ 0,2 „
„ 500 „ „ „ „ „ „ 0,3 „

Die Schädelbasis erschien quer gebrochen. Der Riss verlief auf der oberen Fläche der rechten Schläfenbeinpyramide, über die Sella turcica und durchtrennte noch den grossen linken Keilbeinflügel.

Ausserdem fand sich noch ein quer verlaufender Riss auf der oberen Fläche der linken Schläfenpyramide.

Versuch 5. Schädel eines 43jährigen Mannes.

Belastung.	Quer- (Druck-) Richtung. Total-Verkleinerung.	Differenz in	Bleibende Verkleinerung.	Längsrichtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Senkrechte Richtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Bemerkung.
kg	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	
100	0,7	70		0,02	2		0,14	14		
200	1,2	50	0	0,06	4	0	0,22	8	0	
300	1,6	40		0,10	4		0,42	20		Knistern.
400	2,9	130	0,3	0,22	12	0,22	0,94	52	0,08	Knistern.
				Starkes Krachen, darnach:						
	11,9	900		2,76	254		9,34	840		

Die directe Quermessung auf dem Schädel selbst, in einer Entfernung von 11 cm (Entfernung der Druckplatten = 14 cm) ergab

bei 300 kg Belastung eine Verkleinerung von 0,1 mm
„ 400 „ „ „ „ „ 0,3 „ vor dem Bruche
und nach dem Bruche von 0,5 mm.

Es war die rechte und linke Schläfenwand eingedrückt bis zu Fissuren, welche sich auf der Linea semicircularis oss. parietalis befanden.

Der Druck konnte sodann noch bis 600 kg Belastung gesteigert werden, wobei ein breiter, über die obere Fläche beider Felsenbeinpyramiden und den Clivus verlaufender Querriss auftrat.

Versuch 6. Schädel eines 54jährigen Mannes.

Belastung.	Quer- (Druck-) Richtung. Total-Verkleinerung.	Differenz in	Bleibende Verkleinerung.	Längsrichtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Senkrechte Richtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.
kg	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm
100	0,5	50		0	0		0,08	8	
200	1,1	60		0,06	6		0,14	6	
300	1,6	50	0,2	0,08	2	0	0,24	10	0
400	2,3	70		0,14	6		0,38	14	
				Bei 475 kg Belastung Krachen und Bruch; bei der Messung:					
	7,6	530	2,4	1,46	132	0,4	1,48	110	0,4

Der Schädel zeigte symmetrische Querrisse auf der oberen Fläche beider Felsenbeinpyramiden. Von dem innern Ende des rechtsseitigen setzt sich ein Bruch über den Clivus in das grosse Hinterhauptsloch fort. Ausserdem fand sich ein Querriss in der linken unteren Hinterhauptsgrube.

Versuch 7. Schädel eines 62jährigen Mannes.

Belastung.	Quer- (Druck-) Richtung. Total-Verkleinerung.	Differenz in	Bleibende Verkleinerung.	Längsrichtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Senkrechte Richtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.
kg	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm
100	0,5	50		0,16	16		0,02	2	
200	1,1	60	0	0,30	14	0	0,04	2	0
300	1,7	60		0,36	6		0,08	4	
400	2,2	50	0,4	0,40	4	0,07	0,12	4	0
500	2,6	40		0,58	18		0,24	12	
600	2,9	30	0,5	0,70	12	0,08	0,42	18	0
			Sodann Krachen. Messung darnach:						
	5,8	290	1,5	1,60	90	0,1	2,16	174	0,2

Symmetrischer Querriss der Schädelbasis. Derselbe verläuft über den Clivus und die obere Fläche beider Schläfenbeinpyramiden.

Versuch 8. Schädel eines 69jährigen Mannes.

Belastung.	Quer- (Druck-) Richtung. Total-Verkleinerung.	Differenz in	Bleibende Verkleinerung.	Längsrichtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Senkrechte Richtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Bemerkung.
kg	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	
100	0,4	40		0	0		0,04	4		
200	0,7	30		0,04	4		0,06	2		
300	2,9	220	0,3	0,18	14	0	0,18	12	0,06	
400	4,8	190		0,26	8		0,62	44		Knistern.
				Bei 475 kg Belastung Krachen und Bruch:						
	8,1	330	0,8	1,36	110	0	3,10	248	0,08	

In der Schädelbasis findet sich ein Querbruch, welcher auf der oberen Fläche der linken Schläfenpyramide verläuft, weiterhin über den Clivus geht, den rechten grossen Keilbeinflügel vom Keilbeinkörper abtrennt und in der Fiss. orbit. sup. endet.

Versuch 9. Schädel eines 22jährigen Mädchens.

Belastung.	Quer- (Druck-) Richtung. Total-Verkleinerung.	Differenz in	Bleibende Verkleinerung.	Längsrichtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Senkrechte Richtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Bemerkung.
kg	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	
100	1,3	130		0,02	2		0,06	6		
200	2,8	150	0	0,12	10	0	0,10	4	0	
300	4,5	170		0,18	6		0,18	8		
400	5,8	130	0,5	0,22	4	0,04	0,22	4	0	
500	6,9	110		0,28	6		0,32	10		
600	8,3	140	1,4	0,44	16	0,08	0,46	14	0	Knistern.
	8,8	50		0,54	10		0,60	14		
				Bei 700 kg erfolgte eine Diastase der Coronalnaht.						
	11,3	250	4,6	2,86	232	1,20	1,52	92	0,36	

Versuch 10. Massiver Schädel eines 25jährigen Mädchens.

Belastung.	Quer- (Druck-) Richtung. Total-Verkleinerung.	Differenz in	Bleibende Verkleinerung.	Längsrichtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Senkrechte Richtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Bemerkung.
kg	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	
100	0,3	3		0,02	2		0	0		
200	0,6	3	0	0,06	4	0	0,06	6	0	
300	1,2	6		0,10	4		0,12	6		
400	2,5	13	0	0,16	6	0	0,12	0	0	
500	3,2	7		0,24	8		0,12	0		
600	4,1	9	0,5	0,36	12	0,12	0,12	0	0	Knistern.
700	4,9	8		0,50	14		0,12	0		
				Bei 800 kg starkes Krachen.						
	6,3		1,0	2,08		0,5	1,96		0,5	

An der Schädelbasis fand sich eine Trennung der Naht zwischen linker Schläfenschuppe und linkem Seitenwandbeine einerseits und linkem grossen Keilbeinflügel andererseits. Von hier setzte sich ein Riss quer durch den linken grossen Keilbeinflügel und über den Türkensattel hinweg und endete in einer Diastase der Sutur zwischen rechtem grossen Keilbeinflügel und Schläfenschuppe.

(Siehe Taf. V, Fig. 2.)

Versuch 11. Schädel eines 53jährigen Weibes.

Belastung.	Quer- (Druck-) Richtung. Total-Verkleinerung.	Differenz in	Bleibende Verkleinerung.	Längsrichtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Senkrechte Richtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Bemerkung.
kg	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	
100	0,8	80		0,10	10		0,20	20		
200	2,0	120	0	0,16	6	0	0,40	20	0	
300	3,0	100		0,22	6		0,54	14		Knistern.
400	4,0	100		0,32	10		0,86	32		
				Bei 475 kg Belastung Krachen und Bruch.						
	7,0	300	2,0	0,58	26	0,42	1,60	74	0,56	

Symmetrischer, auf der oberen Fläche beider Schläfenbeinpyramiden und über den Clivus verlaufender Querriss.

(Siehe Taf. V, Fig. 1.)

Versuch 12. Schädel eines 62jährigen Weibes.

Belastung.	Quer- (Druck-) Richtung. Total-Verkleinerung.	Differenz in	Bleibende Verkleinerung.	Längsrichtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Senkrechte Richtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Bemerkung.
kg	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	
100	0,6	60		0,04	4		0,02	2		
200	1,4	80		0,08	4		0,08	6		
300	2,4	100	0	0,10	2	0	0,16	8	0	
400	3,2	80		0,14	4		0,20	4		
500	4,4	120		0,24	10		0,30	10		Knistern.
600	5,4	100	0,5	0,42	18	0	0,56	26	0,08	
				Knistern, dann Krachen und Bruch.						
	8,8	340	2,2	2,18	176	0,62	1,74	118	0,34	

Die Basis cranii zeigt mehrere Querrisse. Zwei derselben verlaufen beiderseits symmetrisch auf der oberen Fläche beider Felsenbeinpyramiden; ein weiterer quer über den Process. anonym. sinist. und ein vierter hinter dem Foramen condyloid. dextr. nach aussen zu.

Versuch 13. Schädel eines 82jährigen Weibes.

Belastung.	Quer- (Druck-) Richtung.			Längsrichtung.			Senkrechte Richtung.			Bemerkung.
	Total-Verkleinerung.	Differenz in	Bleibende Verkleinerung.	Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	
kg	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	
100	0,4	40		0,04	4		0	0		
200	2,2	180	0,4	0,16	12	0,04	0,21	21	0	Knistern.
300	5,2	300		0,54	38		1,30	109		
			Lautes Krachen. Bei 350 kg Belastung starker Krach.							
	6,2	100	1,0	1,22	68	1,0	2,44	114	0	

An der Schädelbasis findet sich ein grosser Querriss, der über die obere Fläche der linken Schläfenbeinpyramide und den Türkensattel hinweg zum rechten Foramen opticum zieht, von hier läuft er, den grossen rechten Keilbeinflügel quer durchtrennend, in eine Fissur der rechten Schläfenschuppe aus.

b) Druck in der Längsrichtung.

Versuch 14. Schädel eines 19jährigen Mannes.

Belastung.	Längs- (Druck-) Richtung.			Querrichtung.			Senkrechte Richtung.			Bemerkung.
	Total-Verkleinerung.	Differenz in	Bleibende Verkleinerung.	Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	
kg	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	
100	0,4	40		0,04	4		0	0		
200	0,7	30		0,12	8		0,02	2		
300	1,4	70		0,16	4		0,02	0		
400	1,8	40	0	0,24	8	0,08	0,02	0	0	
500	2,7	90		0,42	18		0,24	22		Knistern.
				Lautes Krachen und Bruch.						
	11,0	830	1,0	2,12	170	0,2	3,96	372	1,0	

Längsbrüche der Schädelbasis.

Der eine derselben beginnt an der Crista frontalis, verläuft längs der rechten Hälfte der Siebbeinplatte über die Wurzel des grossen und kleinen rechten Keilbeinflügels gegen das Foramen lacer. ant.; dann setzt er sich auf dem Process. anonym. dextr. des Hinterhauptsbeines noch etwas nach hinten fort. Ein zweiter, breiter Längssprung geht vom Tubercul. sellae turcicae schräg nach hinten und aussen gegen das For. lacer. ant. sinistr., weiters dann vom For. jugul. sinistr. in die linke untere Hinterhauptsgrube aus.

Versuch 15. Sehr dickwandiger Schädel eines 24jährigen Mannes.

Belastung.	Längs- (Druck-) Richtung.			Querrichtung.			Senkrechte Richtung.			Bemerkung.
	Total-Verkleinerung.	Differenz in	Bleibende Verkleinerung.	Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	
kg	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	
100	0,4	40		0,02	2		0,06	6		
200	0,6	20		0,04	2		0,06	0		
300	0,9	30	0	0,08	4	0	0,10	4	0	
400	1,2	30		0,12	4		0,14	4		
500	1,6	40		0,16	4		0,16	2		
600	1,8	20	0	0,24	8	0	0,20	4	0	
700	2,2	40		0,26	2		0,22	2		
800	2,5	30		0,28	2		0,22	0		Knistern.
900	2,8	30	0,6	0,34	6	0,02	0,22	0	0,02	
1000	3,4	60		0,40	6		0,20	— 2		
1100	3,8	40		0,44	4		0,12	— 8		
Bei einer Belastung von 1200 kg Knistern, Krachen und Bruch. Messung darnach:										
	5,9	21		0,98	54		— 0,34	— 46		

Die directe Messung auf dem Schädel selbst für eine Messstrecke von 13,0 cm (Entfernung der Druckplatten = 18,7 cm) ergab sowohl während des ganzen Versuchs als auch nach dem Bruche keine Veränderung.

Die Schädelbasis zeigte einen Längssprung, der von der Lamina cribrosa ausgehend nach dem Tuberculum sellae turcicae und von hier in das Foram. lac. ant. dextr. verlief. Weiterhin zieht der Riss vom Foramen jugulare dextr. gegen das Foramen magnum und von hier auf der Crista occipitalis bis zur Eminentia occipit. int.

Versuch 16. Schädel eines 30jährigen Mannes.

Belastung.	Längs- (Druck-) Richtung.			Querrichtung.			Senkrechte Richtung.			Bemerkung.
	Total-Verkleinerung.	Differenz in	Bleibende Verkleinerung.	Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	
kg	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	
100	0,6	60		0,04	4		0			
200	0,8	20		0,04	0		0			
300	1,2	40		0,08	4		0			
400	1,4	20	0	0,19	11	0	0		0	
500	1,8	40		0,30	11		0			Knistern.
Bei einer Belastung von 525 kg Krachen und Bruch.										
	3,9	21	0,5	0,84	54	0	0,2	20	0,05	

Am Hinterhaupte findet sich ein Längssprung. Derselbe beginnt hinter dem Process. anonym. sinister und verläuft in die linke untere Occipitalgrube.

Versuch 17. Dickwandiger Schädel eines 46jährigen Mannes.

Belastung.	Längs- (Druck-) Richtung. Total-Verkleinerung.	Differenz in	Bleibende Verkleinerung.	Querrichtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Senkrechte Richtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Bemerkung.
kg	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	
100	0,4	40		0,14	14		0,04	4		
200	0,6	20		0,14	0		0,06	2		
300	0,9	30		0,20	6		0,08	2		
400	1,2	30	0	0,20	0	0	0,08	0	0	
500	1,6	40		0,22	2		0,06	− 2		
600	1,9	30		0,26	4		0,04	− 2		
700	2,8	90		0,34	8		0	− 4		Knistern.
800	3,5	70	0,7	0,46	12	0,08	− 0,18	− 18		„
900	4,7	120		0,50	4		− 0,30	− 12		„
1000	5,4	70		0,70	20		− 0,36	− 6		
				Starkes Krachen und Bruch.						
	8,0	260	2,9	2,02	132	0,5	+ 0,96	+ 132	0,02	

Die Basis cranii zeigt einen grossen Längssprung, der vom Stirnbeine über die Lamina cribrosa des Siebbeines verläuft, sodann die Verbindung des rechten grossen und kleinen Keilbeinflügels vom Keilbeinkörper abtrennt und zum For. lac. ant. dextr. geht. Vom rechten For. jugulare verläuft er dann in die rechte untere Hinterhauptsgrube (Taf. VI, Fig. 1). Der Riss durchtrennt zugleich sagittal das rechte Oberkiefer in einer der Lage des Canalis infraorbitalis entsprechenden Linie.

Versuch 18. Schädel eines 50jährigen Mannes.

Belastung.	Längs- (Druck-) Richtung. Total-Verkleinerung.	Differenz in	Bleibende Verkleinerung.	Querrichtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Senkrechte Richtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.
kg	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm
100	0,4	40		0,04	4		0		
200	0,7	30	0	0,09	5	0	0		0
300	1,2	50		0,25	16		0		
400	1,6	40	0,1	0,31	6	0,03	0		0

Bei der Belastung von 475 kg erfolgte zuerst Knistern, dann lauter Krach.
Der Druck wurde noch belassen bis zu folgender Formveränderung:

7,8	4,05	2,76

Eine Messung in sagittaler Richtung am Schädel selbst, wobei die Messpunkte 10,8 cm von einander entfernt waren (gegenseitige Entfernung der äussersten Punkte des Schädels in der Druckachse 17,2 cm), ergab bis 200 kg Belastung keine Formveränderung. Bei 200 kg trat eine Annäherung der Messpunkte um 0,1 mm auf und dieselbe blieb bis zum Bruche bei 400 kg. Nach dem Bruche, bei dem Maximum der Formveränderung überhaupt betrug dieselbe 0,9 mm.

Die Schädelbasis zeigte einen grossen Längsbruch, der vom Stirnbeine über die Lamina cribrosa des Siebbeines und über die Wurzel des kleinen und grossen Keilbeinflügels in das For. lac. ant. dextr. verlief; von hier ging derselbe über den Clivus gegen die Mitte des vorderen Randes des For. magn. und endlich in die linke untere Hinterhauptsgrube.

Versuch 19. Schädel eines 60jährigen Mannes.

Belastung.	Längs- (Druck-) Richtung. Total-Verkleinerung.	Differenz in	Bleibende Verkleinerung.	Querrichtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Senkrechte Richtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Bemerkung.
kg	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	
100	0,1	10		0,06	6		0,02	2		
200	0,3	20	0	0,13	7	0	0,04	2	0	
300	0,7	40		0,20	7		0,04	0		Leises Knistern.
400	1,1	30	0	0,20	0	0	0,08	4	0	„
				Krachen und Bruch. Nach dem Bruche:						
	1,3	20	0,5	0,23	3	0,06	0,36	28	0,1	

Die directe sagittale Messung auf dem Schädel für eine Strecke von 13,7 cm (Entfernung der Druckplatten 18,9 cm) ergab erst bei 300 kg Belastung eine Verkleinerung und zwar von 0,2 mm. Dieselbe blieb in gleicher Grösse bis zum Bruche und auch nach dem Zustandekommen desselben.

Längsbruch der Schädelbasis.

Derselbe zieht von der Stirne über das linke obere Orbitaldach gegen die Fissura orbitalis sup. Dabei ist längs des Canalis infraorbitalis das Jochbein vom Oberkieferbeine abgetrennt.

Von der Fissura orbitalis sup. sinistr. geht der Sprung, die Wurzel des grossen und kleinen rechten Keilbeinflügels durchtrennend, gegen das For. lac. ant.; dann vom Foramen jugulare in das Hinterhauptsloch und von diesem auf die Hinterhauptsschuppe längs der Crista occipitalis.

Versuch 20. Schädel eines 61jährigen Mannes.

Belastung.	Längs- (Druck-) Richtung. Total-Verkleinerung.	Differenz in	Bleibende Verkleinerung.	Querrichtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Senkrechte Richtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Bemerkung.
kg	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	
100	0,3	30		0	0		0	0		
200	0,7	40		0,04	4		0	0		
300	0,9	20	0	0,10	6	0	0,10	10	0	
400	1,2	30		0,20	10		0,10	0		
500	1,7	50		0,26	6		0,12	2		Knistern.
600	3,0	130	0,3	0,36	10	0,12	0,12	0	0,04	Knistern.
				Bei 700 kg Belastung Krachen und Bruch.						
	5,5	250		1,66	130		0,64	52		

An der Schädelbasis findet sich ein Längssprung, der vom Stirnbeine über die Lamina cribrosa und den Türkensattel in das linke Foramen lac. ant. geht.

Versuch 21. Schädel eines 20jährigen Mädchens.

Belastung.	Längs- (Druck-) Richtung. Total-Verkleinerung.	Differenz in	Bleibende Verkleinerung.	Querrichtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Senkrechte Richtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Bemerkung.
kg	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	
100	0,6	60		0,14	14		0,06	6		
200	1,3	70		0,20	6		0,12	6		
300	1,8	50	0	0,26	6	0	0,18	6	0	
400	2,4	60		0,32	6		0,30	12		
500	2,9	50		0,40	8		0,42	12		Knistern.
600	3,4	50	0,3	0,50	10	0,02	0,48	6	0,14	
				Krachen und Bruch. Messung darnach:						
	4,5	110	1,1	0,84	34	0,06	0,98	50	0,30	

Im Hinterhauptsbeine findet sich ein Längssprung, der vom Foramen magnum ausgehend in die rechte untere Kleinhirngrube verläuft.

Versuch 22. Schädel eines 25jährigen Mädchens.

Belastung.	Längs- (Druck-) Richtung. Total-Verkleinerung.	Differenz in	Bleibende Verkleinerung.	Querrichtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Senkrechte Richtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Bemerkung.
kg	mm	$^1/_{100}$ mm	mm	mm	$^1/_{100}$ mm	mm	mm	$^1/_{100}$ mm	mm	
100	0,4	40		0,04	4		0,12	12		
200	0,7	30		0,08	4		0,14	2		
300	1,2	50		0,12	4		0,16	2		
400	1,6	40	0	0,18	6	0	0,26	10	0	
500	2,0	40		0,24	6		0,28	2		
600	2,5	50		0,30	6		0,32	4		
700	2,9	40		0,34	4		0,36	4		Leises Knistern.
800	3,2	30	0,4	0,34	0	0	0,36	0	0,04	
	Krachen. Die Belastung von 900 kg rief folgende Formveränderung hervor:									
	6,2	300	2,9	0,66	32	0,44	0,53	17	0,38	

Unter fortschreitender Zerstörung des Schädels konnte die Belastung noch bis 950 kg gesteigert werden.

Längssprung der Schädelbasis, welcher am Stirnbeine beginnt, über die Lamina cribrosa und auf das Tuberculum sellae turcicae verläuft. Weiterhin wird die Wurzel des grossen rechten Keilbeinflügels durchtrennt, indem der Riss in das For. lac. ant. dextr. geht.

Ausserdem findet sich eine Diastase der rechtsseitigen Sutur zwischen Stirn- und Jochbeine, ferner Stirnbeine und grossem Keilbeinflügel, Parietalbeine und Schläfenschuppe.

Versuch 23. Schädel eines 32jährigen Weibes.

Belastung.	Längs- (Druck-) Richtung. Total-Verkleinerung.	Differenz in	Bleibende Verkleinerung.	Querrichtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Senkrechte Richtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.
kg	mm	$^1/_{100}$ mm	mm	mm	$^1/_{100}$ mm	mm	mm	$^1/_{100}$ mm	mm
100	0,4	40		0,06	6		0	0	
200	0,7	30	0	0,12	6	0	0	0	0
300	1,2	50		0,20	8		0,04	4	
400	1,8	60	0,1	0,30	10	0	0,04	0	0
500	2,4	60		0,40	10		0,04	0	
	Bei der Belastung von 600 kg Knistern, dann starker Krach.								
	3,2	80	1,0	0,70	30	0,6			

Der Messpunkt zwischen den Condylen des Hinterhauptsbeines fällt in die Bruchlinie; daher eine Messung nicht mehr möglich.

Bruch der Schädelbasis. Derselbe verläuft von der Lamina cribrosa in das Foramen opticum sinistr., ferner über den Türkensattel zum Foramen lac. ant. sinistr. und über den Clivus zum Hinterhauptsloche; von diesem in die rechte untere Hinterhauptsgrube.

Versuch 24. Schädel eines 58jährigen Weibes.

Belastung.	Längs- (Druck-) Richtung. Total-Verkleinerung.	Differenz in	Bleibende Verkleinerung.	Querrichtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Senkrechte Richtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Bemerkungen.
kg	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	
100	0,4	40		0,03	3		0	0		
200	0,9	50		0,03	0		0	0		
300	1,2	30	0	0,05	2	0	0	0	0	
400	1,6	40		0,07	2		0,02	2		Leises Knistern.
500	2,4	80		0,15	8		0,03	1		
600	3,4	100		0,25	10		0,05	2		Leises Knistern.
Bei 650 kg Belastung Krachen und Bruch.										
	3,7	30		0,33	8					Der Messpunkt am Hinterhauptsbeine fällt in die Bruchstelle; daher die Messung nicht brauchbar.

Die directe sagittale Messung auf eine Messstrecke von 14,33 cm (gegenseitige Entfernung der Druckplatten = 18,2 cm) ergab bei 100 kg eine Verkleinerung von 0,1 mm und erst bei der Bruchbelastung eine solche von 0,2 mm.

Längssprung der Schädelbasis, der von der Lamina cribrosa zum For. optic. sinistr. läuft, dann über den Türkensattel zum For. lac. ant. dextr., von hier über den Proc. innominatus oss. occipitis zum For. magn. und endlich noch längs der Crista oss. occipitis nach aufwärts. (Taf. VI, Fig. 2.)

Dabei ist der linke Oberkiefer in sagittaler Richtung durchtrennt.

Versuch 25. Schädel eines 74jährigen Weibes.

Belastung.	Längs- (Druck-) Richtung. Total-Verkleinerung.	Differenz in	Bleibende Verkleinerung.	Querrichtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Senkrechte Richtung. Total-Vergrösserung.	Differenz in	Bleibende Vergrösserung.	Bemerkung.
kg	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	mm	1/100 mm	mm	
100	0,5	50		0,06	6		0,04	4		
200	0,8	30		0,12	6		0,04	0		
300	1,4	60		0,16	4		0,02	2		Knistern.
Bei 400 kg Belastung Krachen.										
	2,8	140	1,0	0,4	24	0,2	— 0,4	42	0	

Längssprung von der Stirne zur Lamina cribrosa verlaufend. Diese, sowie die beiden Orbitaldächer erscheinen zertrümmert. Dann geht noch ein Sprung von der Fissura orbit. sup. sinistr. zum For. ovale des linken Keilbeines.

Ueberblickt man die ganze Versuchsreihe, so zeigt sich, dass bei Druck auf den Schädel sich derselbe bis zum Bruche in der Druckrichtung manchmal nicht unbeträchtlich verkleinern lässt, und dass dabei in den meisten Fällen die nicht direct gedrückten Durchmesser, z. B. bei Längsdruck der quere und senkrechte, eine stetige, mit dem Drucke zunehmende Vergrösserung erfahren. Diese Längenzunahme der nicht direct gedrückten Durchmesser ist aber ungemein klein und lässt sich nur durch sehr genaue und zugleich vergrössernde Messinstrumente erkennen.

Bei Druck in sagittaler Richtung fand in ein paar Fällen (Versuch 15, 17, 25) im senkrechten Durchmesser nach einer vorhergehenden Vergrösserung eine Verkleinerung statt. Eine erklärende Ursache hiefür lässt sich nur in der Form des Hinterhauptsbeines finden.

Bekanntlich erscheint bei einem sagittalen Schädeldurchschnitte das Hinterhaupt als eine Spirale, an welcher sich nach vornen zu die Schädelbasis befindet. Durch Druck auf diese Spiralform wurde in jenen Fällen eine Hebung der angrenzenden Partie der Schädelbasis und somit die Verkleinerung des senkrechten Durchmessers veranlasst. Warum aber nur in einigen und nicht in allen Fällen eine solche Hebung und warum sie erst nach vorheriger Senkung des Schädelgrundes statthatte, ist schwer zu sagen. Jedenfalls ist darauf die individuelle Verschiedenheit der Schädel von Einfluss, wornach die Spiralform des Hinterhauptsbeines mehr oder weniger ausgebildet sein kann, und auch die Druckachse höher oder tiefer zu liegen kommt. Die Lage der letzteren hängt ja bei Druck zwischen zwei senkrechten Flächen nur von der Schädelform ab. Auch bei einem und demselben Schädel kann möglicherweise durch Vergrösserung der Anlagefläche des Schädels an den Druckplatten bei Zunahme des Druckes eine Verschiebung der Druckachse eintreten, welche auf obiges Verhalten einwirkt.

In zwei Fällen (Versuch 16 und 18) liess sich in senkrechter Richtung bis zum Bruche überhaupt keine Veränderung nachweisen.

Wie die gleichzeitige Messung an den Druckplatten und auf dem Schädel selbst ergab, findet die Zusammendrückung in der Druckachse nicht gleichmässig über den ganzen Schädel statt, sondern es werden hauptsächlich die zunächst dem Drucke ausgesetzten Anlageparticen nach innen gebogen.

So betrug, während sich die Länge der ganzen Druckachse des Schädels zur Länge der auf demselben selbst angebrachten Messstrecke meist wie ungefähr 9 : 7 verhielt,

in Vers.	4	bei	500	kg	Belast.	d.	Verkürz.	d.	ganzen	Druckachse	3,4	mm,	jene	der	Messstrecke	dagegen	nur	0,3	mm	
„	„	5	„	400	„	„	„	„	„	„	2,9	„	„	„	„	„	„	0,3	„	
„	„	15	„	1100	„	„	„	„	„	„	3,8	„	„	„	„	„	„	0,0	„	
„	„	18	„	400	„	„	„	„	„	„	1,6	„	„	„	„	„	„	0,2	„	
„	„	19	„	400	„	„	„	„	„	„	1,1	„	„	„	„	„	„	0,2	„	
„	„	24	„	600	„	„	„	„	„	„	3,4	„	„	„	„	„	„	0,2	„	

Die Verkürzungen und Verlängerungen in den verschiedenen Durchmessern gingen, wie sich bei der complicirten Form des Schädels wohl erwarten lässt, meist nicht proportional den Belastungen, sondern es fand manchmal ein Zurückbleiben der Veränderung gegen die Belastung oder ein umgekehrtes Verhalten statt.

Eine deutliche Elasticitätsgrenze zeigte sich in keinem Falle und die bleibenden Veränderungen wurden sehr oft erst kurz vor dem Bruche messbar.

Bis zur Hälfte der Bruchbelastung konnte aber bei allen Versuchen überhaupt keine bleibende Veränderung bemerkt werden, und ebenso zeigten bis zu dieser Grenze die Totalveränderungen keine sehr abnormen Sprünge, wie dieselben nach dem Ueberschreiten der Hälfte der Bruchbelastung oftmals vorkamen.

Es wurde daher, da es wünschenswerth erschien, wenigstens eine beiläufige Schätzung der Tragfähigkeit und Elasticitätsgrenze zu haben, für statthaft gehalten, bei ungefähr der Hälfte der Bruchbelastung eine muthmassliche Elasticitätsgrenze anzunehmen, den Schädel also bis zu diesem Punkte der Inanspruchnahme als vollkommen elastisch zu betrachten.

Schon verhältnissmässig frühzeitig traten Continuitätstrennungen des Schädels auf, wie das von solchen offenbar herrührende Knistergeräusch bewies.

Zur Zeit des Auftretens desselben war aber meist weder eine ungewöhnliche Zunahme der Total-

veränderungen, noch eine sichtbare Veränderung des Schädels zu bemerken und auch die Belastung konnte noch hoch gesteigert werden.

Wahrscheinlich sind daher diese Zusammenhangstrennungen ungemein klein und für das blosse Auge nicht erkennbar und es dürfte gerechtfertigt erscheinen, als Moment des Schädelbruches nicht das erste Auftreten dieses Knistergeräusches, sondern die meist mit lautem Krachen erfolgende sichtliche Continuitätstrennung des Schädels anzunehmen, bei welcher auch die Totalveränderungen eine beträchtliche Zunahme erfuhren und meist auch das Maximum der möglichen Belastung erreicht war.

Die nach dem Bruche statthabende Veränderung der Schädeldurchmesser hängt in ihrer Grösse natürlich bloss davon ab, wie lange willkürlich die Belastung noch fortgesetzt, wie weit also der Schädel zerstört wurde.

Ebenso ist die Grösse der bleibenden Veränderungen nach dem Bruche nur bedingt durch die Ausdehnung des erzeugten Bruches.

Wie ersichtlich, kehrte der Schädel nach dem Aufhören des Druckes meist nahezu vollständig wieder zu seiner alten Form zurück.

Nachstehend sind die Bruchbelastungen, ferner die Totalveränderungen bis zum Bruche, die Veränderungen bei der muthmasslichen Elasticitätsgrenze und endlich die aus diesen ausgerechneten elastischen Veränderungen für 100 kg Belastung zusammengestellt.

Druck in querer Richtung.

Versuchs-Nro.		Alter. Jahre.	Bruchbelastung. kg	Totalveränderung bis zum Bruche. Quer-Verkleinerung. mm	Längs-Vergrösserung. mm	Senkrechte Vergrösserung. mm	Veränderung bis zur muthmasslichen Elasticitätsgrenze. Quer-Verkleinerung. mm	Längs-Vergrösserung. mm	Senkrechte Vergrösserung. mm	Elastische Veränderung für 100 kg Belastung. Quer-Verkleinerung. mm	Längs-Vergrösserung. mm	Senkrechte Vergrösserung. mm
2	Männer.	18	500	7,0	1.06	1,24	3,1	0,42	0,38	1,0	0,14	0,12
3		19	400	6,5	0,44	1,18	1,9	0,18	0,10	0,9	0,09	0,05
4		34	600	3,4	0,18	0,46	1,9	0,06	0,20	0,6	0,02	0,07
5		43	400	2,9	0,22	0,94	1,2	0,06	0,22	0,6	0,03	0,11
6		54	450	2,3	0,14	0,38	1,1	0,06	0,14	0,6	0,03	0,07
7		62	600	2,9	0,70	0,42	1,7	0,36	0,08	0,6	0,12	0,03
8		69	475	4,8	0,26	0,62	0,7	0,04	0,06	0,4	0,02	0,03
9	Weiber.	22	700	8,8	0,54	0,60	4,5	0,18	0,18	1,5	0,06	0,06
10		25	800	4,9	0,50	0,12	2,5	0,16	0,12	0,6	0,04	0,03
1		45	500	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11		53	475	4,0	0,32	0,86	2,0	0,16	0,40	1,0	0,08	0,20
12		62	600	5,4	0,42	0,56	2,4	0,10	0,16	0,8	0,03	0,05
13		82	300	5,2	0,54	1,30	0,4	0,04	0	0,4	0,04	0

Druck in der Längsrichtung.

Versuchs-Nro.		Alter. Jahre.	Bruchbelastung. kg	Totalveränderung bis zum Bruche. Längs-Verkleinerung. mm	Quer- Vergrösserung. mm	Senkrechte Vergrösserung. mm	Veränderung bis zur muthmasslichen Elasticitätsgrenze. Längs-Verkleinerung. mm	Quer- Vergrösserung. mm	Senkrechte Vergrösserung. mm	Elastische Veränderung für 100 kg Belastung. Längs-Verkleinerung. mm	Quer- Vergrösserung. mm	Senkrechte Vergrösserung. mm
14	Männer.	19	500	2,7	0,42	0,24	0,7	0,12	0,02	0,4	0,06	0,01
15		24	1200	3,8	0,44	0,12	1,8	0,24	0,20	0,3	0,04	0,03
16		30	525	1,8	0,30	0	0,8	0,04	0	0,4	0,02	0
17		46	1000	5,4	0,70	—0,36	1,6	0,22	0,06	0,3	0,04	0,01
18		50	475	1,6	0,31	0	0,7	0,09	0	0,3	0,04	0
19		60	400	1,1	0,20	0,08	0,3	0,13	0,04	0,2	0,06	0,02
20		61	700	3,0	0,36	0,12	0,9	0,10	0,10	0,3	0,03	0,03
21	Weiber.	20	600	3,4	0,50	0,48	1,8	0,26	0,18	0,6	0,08	0,06
22		25	800	3,2	0,34	0,36	1,6	0,18	0,26	0,4	0,04	0,06
23		32	600	2,4	0,40	0,04	1,2	0,20	0,04	0,4	0,07	0,01
24		58	650	3,4	0,25	0,05	1,2	0,05	0	0,4	0,02	0
25		74	400	1,4	0,16	0,02	0,8	0,12	0,04	0,4	0,06	0,02

Aus der Zusammenstellung ist ersichtlich, dass die Formveränderung in der Druckrichtung bei Querdruck grösser ist als bei sagittalem Drucke.

Die Veränderung in den beiden senkrecht zur Druckachse stehenden Durchmessern ist bei Querdruck bald in dem sagittalen, bald in dem senkrechten eine grössere, während bei Sagittaldruck der quere Durchmesser meist eine etwas grössere Veränderung erfuhr als der senkrechte.

Das Maximum der Veränderung in der Druckrichtung bis zum Bruche betrug 8,8 mm und bis zur muthmasslichen Elasticitätsgrenze 4,5 mm; die grösste Veränderung in einem der beiden senkrecht zur Druckrichtung stehenden Durchmesser bis zum Bruche war 1,3 mm, bis zur Elasticitätsgrenze 0,4 mm.

Bis zum Bruche erlitt die grösste Formveränderung bei Querdruck der Schädel des 22jährigen Mädchens Versuch 9, nämlich eine Verkleinerung in der Druckrichtung von 8,8 mm und eine Vergrösserung in sagittaler Richtung von 0,54 mm und in senkrechter Richtung von 0,6 mm.

Bei Sagittaldruck veränderte sich bis zum Bruche am stärksten der Schädel des 46jährigen Mannes (Versuch 17). Er erlitt im gedrückten Sagittaldurchmesser eine Verkleinerung um 5,4 mm, im senkrechten Durchmesser eine Verkleinerung um 0,36 mm und im queren eine Vergrösserung um 0,7 mm.

Die grösste beobachtete Veränderung innerhalb der muthmasslichen Elasticitätsgrenze bei Querdruck war gleichfalls bei dem 22jährigen Mädchen Versuch 9. Bei Sagittaldruck veränderte sich innerhalb der Elasticitätsgrenze am bedeutendsten der Schädel des 20jährigen Mädchens (Versuch 21).

In sagittaler Richtung trägt der Schädel eine grössere Belastung als in querer. Es war in sagittaler Richtung

das	Mittel	der Bruchbelastung	650	kg
„	Maximum	„ „	1200	„
„	Minimum	„ „	400	„

in querer Richtung

das	Mittel	der Bruchbelastung	520	kg
„	Maximum	„ „	800	„
„	Minimum	„ „	350	„

Die grössere Formveränderung in der Druckrichtung bei Querdruck und die kleinere Bruchbelastung dabei, sowie das umgekehrte Verhalten bei Längsdruck erklärt sich aus der eiförmigen Gestalt des Schädels, dessen lange Seiten grössere Einbiegungen erlauben, aber dem entsprechend nur geringerem Drucke zu widerstehen vermögen.

Ich hatte auch versucht, den Einfluss des Alters, der Grösse und Dicke des Schädels auf seine Festigkeit und Elasticität zu eruiren.

So viel steht ja fest, dass bei gleichem äusseren Durchmesser eine dickere Hohlkugel mehr tragen wird, als eine mit dünneren Wandungen, während bei gleicher Dicke der Wandung eine kleinere mehr trägt als eine grosse.

Durch eiförmige Gestalt sind ferner für die Belastung der schmalen Seiten günstigere Verhältnisse, für die Belastung der breiten Seiten dagegen ungünstigere Verhältnisse gegeben als bei einer gleich grossen Kugelform, und innerhalb der Eiform ist die Tragfähigkeit wieder beeinflusst durch das gegenseitige Grössenverhältniss der beiden Durchmesser.

Beim Schädel hat ausserdem, da derselbe kein gleichmässig starkes Hohlgebilde ist, sondern die Basis durch die vielen Löcher und Oeffnungen entschieden schwächer als das Gewölbe erscheint, für den Widerstand gegen Belastungen die Höhe der Druckachse eine grosse Bedeutung. Je näher in Folge der Form des Schädels dieselbe der Basis zu liegen kommt, auf desto schwächere Stellen kommt die unmittelbare Druckwirkung, eine desto geringere Belastung wird der Schädel tragen.

Bei dem Versuche nun, die Ergebnisse in erwähnter Weise zu sichten, zeigte es sich, dass die individuellen Verschiedenheiten bezüglich Grösse, Dicke, Verhältniss des Längsdurchmessers zum Querdurchmesser, Höhe der Druckachse, Alter, zu viele sind, um aus Versuchen an 25 Schädeln in dieser Beziehung Schlüsse machen zu können. Ein Moment verwischt das andere und es gehörte zu solchen Folgerungen eine Versuchsreihe, die sich im Mindesten auf mehrere Hunderte von Schädeln erstreckte.

Wesentlich durch die Dicke des Schädels beeinflusst, dürften die grossen Bruchbelastungen (Versuch 15 und 17) sein, wesentlich durch das Alter die geringen Bruchbelastungen bei den ziemlich dickwandigen Schädeln des 74jährigen und 82jährigen Weibes (Versuch 25 und 13). Hauptsächlich durch die Lage der Druckachse endlich, welche hier sehr hoch zu liegen kam, veranlasst, ist die hohe Belastung bei dem ziemlich dünnwandigen Schädel des 22jährigen Mädchens (Versuch 9). Es hatte hier besonders das Schädelgewölbe den Druck auszuhalten, wie auch die auftretende Diastase der Coronalnaht und das Unversehrtbleiben der Schädelbasis zeigt.

Die Resultate vorstehender Versuche weichen sowohl von jenen Bruns', als von jenen Baum's ab.

Während sie einerseits, entgegen Baum, eine Veränderung in sämmtlichen Schädeldurchmessern bei Druck erweisen, führen sie andererseits die von Bruns gemachten exorbitanten Angaben über die Vollkommenheit der Schädelelasticität auf ein sehr bescheidenes Mass zurück.

Mit Ausnahme zweier Fälle, in welchen der Bruch durch radiale, von der Druckstelle ausgehende Sprünge (Versuch 1 und 5) herbeigeführt wurde und der beiden Fälle von Nahtdiastase (Versuch 9 und 22), lag die Continuitätstrennung in der Basis des Schädels, der schwächsten und gewiss auch sprödesten Partie der Schädelkapsel.

Sie bildete constant einen die Schädelbasis halbirenden Riss, welcher parallel verlief mit der Druckrichtung, also bei Längsdruck einen Längsriss, bei Querdruck einen Querriss (siehe Taf. V und VI).

Bekanntlich wurde auch beim Lebenden ein ähnliches Verhalten öfters beobachtet, indem bei Angriff der Kraft auf die Stirne oder das Hinterhaupt Längsbrüche, bei seitlicher Gewalteinwirkung gerne Querbrüche der Basis cranii sich fanden.

Der Bruch der Basis suchte meist wieder die schwächsten Stellen derselben auf, indem er gewöhnlich nach den natürlichen Lücken und Oeffnungen seinen Verlauf richtete.

Bei Querdruck war der Bruch constant in der mittleren Schädelgrube und zwar mit Vorliebe symmetrisch von der oberen Fläche der einen Schläfenpyramide über den Clivus auf die obere Fläche der anderen Schläfenpyramide verlaufend (Taf. V, Fig. 1). Dabei drang der Riss beiderseits in die Paukenhöhle ein.

Bei Längsdruck befand er sich besonders häufig in der Siebbeinplatte und strebte dem Foramen lacer. anterius und dem Foramen jugulare zu, um in einer der unteren Hinterhauptsgruben zu enden.

Der Bruch klaffte in einigen Fällen in der Mitte seines Verlaufes nicht unbeträchtlich und schien seinen Ausgangspunkt in der Basis selbst zu haben, von wo er nach den Druckstellen verlief. Diese ursprüngliche Entstehung des Bruches hierselbst war ganz unzweifelhaft in ein paar Fällen, in welchen die Fissur auf die Basis beschränkt blieb, und sich nicht die mindesten Ausläufer nach den Druckstellen zu fanden.

Zur Erklärung der Bruchform ist es einleuchtend, dass bei Beanspruchung einer Hohlkugel in derselben Weise, wie es beim Schädel geschah, der Bruch je nach der Beschaffenheit des Materials nur entweder durch Gegeneinander- und Uebereinanderschieben der am meisten gedrückten Theile oder durch Bersten der am stärksten gedehnten Partieen eintreten wird.

Im ersteren Falle (ein Zerdrückungs- oder Zertrümmerungsbruch kam nur dreimal zur Beobachtung in Versuch 1, 5 und 25) ist die Bruchlinie senkrecht zur Druckachse verlaufend.

Im zweiten Falle, beim Bersten eines Hohlgebildes dagegen lässt sich überhaupt kein anderer als ein mit der Druckrichtung parallel verlaufender Riss denken, dessen Beginn in irgend einen Punkt einer Linie fällt, welche ähnlich wie der Aequator von den Erdpolen gleichweit von beiden Druckpunkten um das Hohlgebilde herumläuft.

Und in der That war beim Schädel, wie aus dem Gesagten hervorgeht, (abgesehen von obigen drei Zertrümmerungsbrüchen) die Entstehung des Bruches eine ganz gleiche, nur erfolgte bei ihm wegen der ungleichen Wandstärke der Beginn des Bruches nicht in einem beliebigen Punkte der Peripherie, sondern fast ausnahmlos im schwächsten Theile, in der Basis, und hatte auch hier wieder seinen Ausgangspunkt an den verschiedenen Oeffnungen und schwachen Stellen.

Die auf diese Weise durch Druck erzeugten Schädelfracturen waren somit in den meisten Fällen nicht an der Stelle der directen Druckeinwirkung, sondern entfernt von derselben entstanden, sie waren durch indirecte Gewalt erzeugt.

Diess ist besonders wichtig, da man sich in gleicher Weise durch die Bruns'sche Lehre von der Schädel-Elasticität den Mechanismus der beim Lebenden durch Stoss hervorgebrachten Fracturen par contrecoup erklärt.

Eine solche Erklärung ist zum Mindesten viel einfacher und wahrscheinlicher, als jene durch die Schwingungstheorie, wornach Wellen, deren Vorkommen am Schädel noch Niemand nachgewiesen hat, am Orte der Gewalteinwirkung entstehen und entfernt von demselben den Bruch herbeiführen sollen.

2) Druck vermittelst der Wirbelsäule in senkrechter Richtung auf den Schädel.

An 8 Schädeln wurde in jenem Theile der Werder'schen Maschine, in welchem die Schädeldruckversuche zwischen den zwei ebenen Platten ausgeführt worden waren, auch ein Druck in senkrechter Richtung vermittelst eines aus 3—4 Wirbeln bestehenden Stückes der Wirbelsäule auf den Schädel ausgeübt.

Der Druck fand also einerseits auf die Scheitelhöhe, andererseits auf die untere Fläche des dritten oder vierten noch in Verbindung mit dem Schädel gelassenen Wirbelkörpers statt.

In ganz der gleichen Weise wie bei den bereits aufgeführten Schädelversuchen wurde auch hier eine Messung in der senkrechten, queren und der Längsrichtung vorgenommen. Die Steigerung der Belastung geschah meist von 20 zu 20 kg.

In diesen Versuchen erfolgte nun der Bruch bei einer verhältnissmässig niederen Belastung und ohne dass zuvor durch die Messung irgend eine Veränderung in den verschiedenen Schädeldurchmessern constatirt werden konnte. Die schwache und zugleich auch spröde Schädelbasis wird eben sehr bald zerstört, bevor noch der Druck eine wesentliche Einwirkung auf das ganze Schädelgehäuse gewinnt.

Vor dem Bruche der Schädelbasis erfolgte in mehreren Fällen ein Bruch des Atlas- oder des Epistropheusringes. Die Versuche sind folgende:

		Männer.						Weiber.	
Alter:	Jahre	24	27	33	42	59	60	44	60
Bruch der Schädelbasis:	kg	250	300	250	300	225	250	300	275

Wie ersichtlich weichen die erhaltenen Bruchbelastungen in ihrer Grösse nicht besonders von einander ab und es war darnach das

Mittel	der Belastung	. . . . .	270 kg
Maximum	„ „	. . . . .	300 „
Minimum	„ „	. . . . .	225 „

Nach Absägung des Schädeldaches liess sich der Bruch genau übersehen, und es fanden sich meist die Condylen des Hinterhauptsbeines sammt dem Türkensattel und auch einer oder beider Felsenbeinpyramiden nach innen getrieben. Die gleiche Bruchform beschreibt auch Baum.[1] Die äussersten Grenzen der Fractur bilden eine mit der Horizontalebene concentrische Linie, stehen also senkrecht zur Druckachse.

In Fig. 1 Taf. VII ist ein solcher Bruch abgebildet, bei welchem auch noch das ganze Tuberculum ephipii zur eingedrückten Partie gehört. In den meisten Fällen aber blieb dieser Theil unversehrt und die Bruchlinie ging quer über den Türkensattel.

Wie die mehrfach in der Literatur aufgeführten Beispiele zeigen, wurde durch Einwirkung einer stumpfen Gewalt auf den Scheitel auch beim Lebenden schon öfters ein Hineintreiben der Wirbelsäule in das Schädelinnere und ein gleicher Bruch hervorgerufen.

---

[1] l. c.

3) Concentrirter Druck an verschiedenen Stellen des Schädels mittelst eines Druckbolzens.

Da sehr oft eine äussere Gewalt den Schädel nur an einer kleinen Stelle angreift, so sollte auch dieser Fall einigermassen nachgeahmt, und die Widerstandsfähigkeit in verschiedenen Bezirken des Schädels ermittelt werden. Der zum Drucke benützte Bolzen hatte eine cylinderförmige Gestalt, einen Durchmesser von 17 mm und war vornen etwas abgerundet.

Die Prüfung geschah in dem Theile der Werder'schen Maschine für Druck und die Art der Versuchsanordnung ist leicht aus Fig. 3, Taf. III auch ohne weitere Beschreibung verständlich. Während dabei der Druck auf eine kleine Stelle concentrirt war, fand, wie ersichtlich, doch eine Beanspruchung des ganzen Schädels statt.

Der Schädel wurde durch diesen concentrirten Druck (ausgenommen die drei unten erwähnten Fälle von Längsrissen) entsprechend dem Durchmesser des Bolzens durchlocht, ohne dass die nächste Umgebung der gedrückten Stelle in Mitleidenschaft gezogen wurde. Es erfuhren daher durch Anbringung des Druckes an mehreren Stellen eines und desselben Schädels die Resultate keine Beeinträchtigung.

Der Moment der beginnenden Durchlochung liess sich jedesmal schon voraus bestimmen, indem um die Druckstelle herum eine Art weissen Hofes auftrat, der von ganz kleinen, die weisse Farbe hervorrufenden Continuitätstrennungen herrührte.

In unmittelbarer Nähe der Bruchstelle wurde nach den Versuchen die mittlere Dicke des Schädels für den betreffenden Ort mit dem Tastercirkel bestimmt.

Einigemale brachte ich auch den Druck vermittelst des Bolzens auf die Mitte des Jochbogens an.

Die zum Zustandekommen der Brüche nöthigen Belastungen in Kilo sind nachstehend angeführt. Die kleingedruckten Zahlen geben die mittlere Schädeldicke in mm an.

Alter.	Körperseite.	Stirnbeinmitte.	Seitenwandbeinmitte.	Aeusserer Hinterhauptshöcker.	Schläfenschuppe.	Jochbogen.
Mann 24	R		300			
		450	4,7			
	L	6,5	290			
			4,4			
— 27	R		410			
		825	4,9	975 *		
	L	6,4	360	12,0		
			4,3			
— 41	R		180			30
		280	5,0			
	L	5,7	200			25
			5,5			
— 49				575		
				12,5		
— 50	R		350		170	25
		430	5,0	600 *	4,0	
	L	5,5	370	10,0	190	35
			5,2		4,0	
— 59		400				
		5,7				
— 61	R		400			35
			6,4	600		
	L		375	12,0		
			5,9			
— 75	R		375			
			6,5			
	L		375			
			6,5			
Weib 28	R		400			
		325	5,7	525 *		
	L	3,2	500	10,0		
			6,1			
Maximum		825	500	975	190	35
Minimum		280	180	525	170	25

Bei diesen Versuchen zeigte es sich, dass die Gesammtdicke der Schädelwandung von keiner wesentlichen Bedeutung für den Widerstand gegen die Durchlochung war, indem sehr oft bei dickwandigen Schädeln relativ kleine Bruchbelastungen vorkommen und umgekehrt bei dünnwandigeren grössere.

Von besonderem Einflusse ist hier die Mächtigkeit der Diploë, welche wohl die Dicke des Schädels vermehren hilft, für die Tragfähigkeit aber nur wenig ausmacht.

Durch Druck auf den äusseren Hinterhauptshöcker kam in den drei mit * bezeichneten Fällen nicht eine Durchlochung dieser enorm starken Partie zu Stande, sondern es erfolgte ein Längsbruch, genau wie bei den Druckversuchen zwischen den zwei ebenen Platten: bei dem 27jährigen und 50jährigen Manne brach die Basis cranii der Länge nach, bei dem 28jährigen Weibe hatte eine Diastase der Sutura sagittalis statt.

Während also in den übrigen Fällen nur die Festigkeit der betreffenden Partie, auf welche der Druck unmittelbar stattfand, überwunden wurde, erfolgte hier eine Ueberwindung der Festigkeit des ganzen Schädelgehäuses.

Auf Taf. VII sind mehrere Impressionen, welche dadurch zu Stande kamen, dass der Druck nicht bis zur völligen Durchlochung fortgesetzt wurde, abgebildet.

II. Unterkiefer.

Weber[1] gibt an, er habe die Mandibula eines 44jährigen Mannes bei Belastung der Unterkieferwinkel durch einen Druck von 150 Pfund gebrochen, während der Unterkiefer eines anderen Mannes bei Belastung des Kinnes erst mit 1100 Pfund brach.

Auch ich stellte meine Versuche über die Festigkeit des Unterkiefers in dieser zweifachen Weise an. Dabei war der Knochen meist vom Kopfe abgetrennt; um jedoch zu sehen, ob sich die Verhältnisse gleich gestalten bei Belassung des Kiefers in der natürlichen Gelenkverbindung mit dem Schädel, wurden auch in dieser Weise mehrere Prüfungen vorgenommen. Die Versuche geschahen in dem Theile der Werder'schen Maschine für Druckfestigkeit, und die Belastungen waren mit 10 kg gesteigert worden.

1) Seitlicher Druck auf die Kieferwinkel.

Den Druck auf die Verbindungsstelle der Kieferäste mit dem Kieferkörper vermittelten zwei kleine Holzwürfel.

Bei dieser Art der Beanspruchung hängt die Grösse der Bruchbelastungen natürlich nicht allein von der Substanz und der Stärke des betreffenden Unterkiefers ab, sondern auch besonders noch von der Länge des Hebelarmes, an welchem die Kraft wirkt, von der Entfernung der Kieferwinkel bis zur Mitte des Unterkieferkörpers.

Es war daher darauf gesehen worden, dass der eine Rand der kleinen Holzwürfel mit dem hinteren Kieferastrande zusammenfiel, dass also alle Kiefer in gleicher Weise angestrengt wurden.

Während des Druckes bis zum Bruche fand eine nicht unbeträchtliche Annäherung der Unterkieferäste gegeneinander statt, die im Maximum 10,5 mm betrug. Dabei behinderten bei Prüfung in Verbindung

---

[1] l. c.

mit dem Schädel die Gelenkkapsel und die Gelenkbänder diese Annäherung in keiner Weise, der Kiefer blieb während des ganzen Versuchs in freier Beweglichkeit gegen den Schädel.

Die Messung der Annäherung geschah mit dem Tastercirkel an zwei vorher markirten Punkten der Kieferäste.

Regelmässig erfolgte der Bruch unter Krachen in der Mitte oder nahe der Mitte des Körpers der Mandibula (Taf. VIII, Fig. 1 und 2). Die dazu nöthige Kraft war bei einem 18jährigen, kindlich aussehenden Individuum 40 kg und die Annäherung der Kieferäste betrug 10,5 mm.

Bei vierzehn erwachsenen Personen fand sich Folgendes:

Männer.

Alter:	Jahre	24[1]	30	34	43	54	60	75
Bruchbelastung:	kg	130	70	90	70	70	80	65
Annäherung der Kieferäste bis zum Bruche:	mm	9,0	4,2	—	4,0	8,0	—	—

Weiber.

Alter:	Jahre	22	25	44	45	53	60	82
Bruchbelastung:	kg	35	50	45	60	40	40	25
Annäherung der Kieferäste bis zum Bruche:	mm	10,0	—	6,5	6,0	—	4,0	6,5

2) Längsdruck von der Kinnspitze gegen die Gelenkfortsätze.

Der Bruch erfolgte regelmässig ganz ruhig und ohne Krachen am Halse des Unterkiefers unterhalb des einen oder unterhalb beider Capitula. In mehreren Fällen war er ein unvollständiger (siehe die Abbildungen Taf. VIII, Fig. 3 und 4).

Dabei fand bis zum Bruche ein Auseinandergehen der Kieferäste statt, welches im Maximum 13,3 mm betrug und das einmal so weit gedieh, dass der Kieferkörper in der Mitte entzweibrach.

Wurde vor dem Bruche die Belastung wieder abgenommen, so kehrten die Kieferäste vollständig oder nahezu vollständig (höchstens 0,6 mm bleibende Veränderung) in ihre alte Lage zurück.

Die Messung geschah wie bei Querdruck. Bei Prüfung in Verbindung mit dem Schädel wurde dasselbe Resultat wie bei Prüfung der abgetrennten Mandibula erhalten.

Nachstehend die Belastungen und die Grösse des Auseinanderweichens der Unterkieferäste während des Versuchs:

Männer.

Alter:	Jahre	18	19	25	31	34	49	59	69
Bruchbelastung:	kg	210	170	225	220	200	225	190	100
Auseinandergehen der Kieferäste:	mm	13,3	4,4	—	6,0	—	—	3,9	5,8

Weiber.

Alter:	Jahre	24	32	42	74
Bruchbelastung:	kg	260	170	180	120
Auseinandergehen der Kieferäste:	mm	8,5	—	5,5	5,3

Bei Druck auf die Kinnspitze hält somit der Unterkiefer entschieden mehr als bei seitlichem Drucke, trotz der Verschiedenheit in den Dimensionen der Bruchstellen, des Unterkieferhalses im ersteren und des Unterkieferkörpers im letzteren Falle. In dem hohen Grade, wie Weber, konnte ich allerdings einen Unter-

[1] Dieser Mann hatte ungemein massive Knochen.

schied in den Belastungen nicht finden und ich glaube, dass Weber bei seiner Prüfung des mit den Weichtheilen noch bedeckten Knochens den Bruch des Halses übersah und den Druck fortsetzte, bis ein Bruch im Körper oder den Aesten auftrat.

Bei meinen Versuchen an erwachsenen Personen war bei Querdruck:

	das	Mittel	der Bruchbelastung	. . . .	60 kg
	„	Maximum	„ „	. . . .	130 „
	„	Minimum	„ „	. . . .	25 „
bei Längsdruck:	das	Mittel	„ „	. . . .	190 „
	„	Maximum	„ „	. . . .	260 „
	„	Minimum	„ „	. . . .	100 „

Der Unterkiefer des 34jährigen Mannes war auf beide Arten geprüft worden, zuerst Druck von vornen nach hinten, wobei das eine Capitulum bei der Belastung von 200 kg abbrach, sodann Querdruck und Bruch des Unterkieferkörpers bei 90 kg.

III. Wirbel.

Wirbelbrüche kommen häufig dadurch zu Stande, dass der Wirbelkörper in senkrechter Richtung comprimirt wird.

In einer Anzahl von Versuchen war daher ein senkrechter Druck auf die Wirbelkörper ausgeübt worden; dabei zeigte es sich, dass die getragenen Belastungen im Allgemeinen mit der Grössenzunahme der Wirbel von den Hals- bis zu den Lendenwirbeln wachsen, dass jedoch in dieser aufsteigenden Reihe einzelne kleinere Zahlen vorkommen.

Dieser Befund ist ähnlich jenem von Bardeleben[1], welcher das Gewicht der menschlichen Wirbel wohl von oben nach unten zunehmend fand, aber zugleich constatirte, dass einzelne der oberen Brust- und unteren Lendenwirbel von diesem im Allgemeinen gültigen Gesetze eine Ausnahme machen.

Bei einem 56jährigen Manne zeigte sich folgende Reihe der Bruchbelastungen:

3.	Halswirbel	150 kg	1.	Brustwirbel	200 kg	1.	Lendenwirbel	400 kg
4.	„	150 „	2.	„	200 „	2.	„	425 „
5.	„	170 „	3.	„	190 „	3.	„	350 „
6.	„	170 „	4.	„	210 „	4.	„	400 „
7.	„	170 „	5.	„	210 „	5.	„	425 „
			6.	„	220 „			
			7.	„	250 „			
			8.	„	250 „			
			9.	„	320 „			
			10.	„	360 „			
			11.	„	400 „			
			12.	„	375 „			

[1] Beiträge zur Anatomie der Wirbelsäule. Jena 1874.

Für eine Anzahl von Versuchen wurde die Druckfestigkeit der Spongiosa berechnet, zu welchem Zwecke nach querer Durchschneidung der Mitte des Wirbelkörpers und Abzeichnung des Querschnittes die Querschnittsgrösse planimetrisch bestimmt wurde.

Diese Versuche sind folgende:

	Bruchbelastungen in kg.						
	Halswirbel.	Brustwirbel.			Lendenwirbel.		
	4.	1.	6.	10.	1.	4.	5.
25jähriges Weib	—	300	360	480	620	—	740
30jähriger Mann	275	450	600	850	1000	—	975
34jähriges Weib	—	—	—	—	—	800	—
51jähriges Weib	240	250	280	420	540	—	560
56jähriger Mann	—	—	220	360	400	400	425
80jähriges Weib	—	—	—	—	—	250	—
81jähriges Weib	—	—	—	—	240	—	—

Die daraus berechneten Druckfestigkeiten der Spongiosa in kg pro qcm sind nachstehend angeführt. Die klein gedruckten Zahlen geben die Querschnittsgrösse in qcm an.

	Brustwirbel.			Lendenwirbel.		
	1.	6.	10.	1.	4.	5.
25jähriges Weib	52	63	51	56	—	64
	5,8	5,7	9,4	11,1		11,6
30jähriger Mann	92	92	80	78	—	78
	4,9	6,5	10,6	12,7		12,5
34jähriges Weib	—	—	—	—	62	—
					12,9	
51jähriges Weib	55	67	57	67	—	60
	4,5	4,2	7,4	8,0		9,3
56jähriger Mann	—	44	45	32	32	34
		5,0	8,0	12,5	12,3	12,6
80jähriges Weib	—	—	—	—	22	—
					11,2	
81jähriges Weib	—	—	—	27	—	—
				9,0		

Die Zahlen bei den Personen im mittleren Lebensalter stimmen vollständig mit jenen überein, welche Rauber bei Druckversuchen mit Würfeln von 10 mm Kante aus dem Innern des Wirbelkörpers eines erwachsenen Menschen erhalten hatte.

Bei alten Personen nimmt die Druckfestigkeit ganz bedeutend ab, gewiss in Folge des Schwundes von Spongiosabälkchen.

Regelmässig kamen unvollständige Fracturen zu Stande (Taf. VIII, Fig. 5—8), welche identisch mit den von Middeldorpf als Compressionsfracturen bezeichneten Bruchformen erschienen.

IV. Thorax.

Mittelst der Werder'schen Maschine wurde theils in sagittaler, theils in querer Richtung ein Druck auf den Thorax ausgeübt und zwar so, dass in der Druckrichtung ein seitliches Ausweichen des Thorax nicht möglich war.

Die Eingeweide und Muskel waren dabei entfernt worden; das Belassen der Intercostalmuskeln in einigen Experimenten zeigte keinen Einfluss auf den Ausfall des Versuchs.

Bei zwei jugendlichen Individuen, einem 18jährigen und einem 24jährigen Manne, konnte durch sagittalen Druck das Sternum im ersteren Falle durch eine Belastung von 60 kg, im letzteren durch eine Belastung von 100 kg der Wirbelsäule vollständig angelegt werden, ohne dass ein Bruch eintrat.

Bei älteren Personen erfolgten ein oder mehrere Rippenbrüche an dem Rippenhalse oder auch ein Abbrechen der Knorpelverbindungen mit dem Sternum, nachdem eine Annäherung des Sternums an die Wirbelsäule bis auf 1—3 cm Zwischenraum stattgefunden hatte.

Die bis zum Eintreten der Brüche nöthigen Belastungen waren:

bei einem	40jährigen	Manne	60	kg
„ „	42 „	„	80	„
„ „	82 „	Weibe	40	„

Bei Querdruck erfolgten Rippenbrüche, nachdem die Querentfernung des Thorax (in der Mitte seiner Höhe gemessen) bis auf ein Drittel ihrer ursprünglichen Länge verkürzt erschien.

Die Belastungen bis hieher waren:

bei einem	28jährigen	Weibe	130	kg
„ „	30 „	Manne	200	„
„ „	33 „	Manne	60	„

Der Bruch erfolgte theils am Rippenhalse, theils in der Mitte der Rippen.

V. Becken.

O. Weber[1] zerbrach das Becken eines 44jährigen Mannes mit einer Belastung von 512 kg. In welcher Richtung der Druck auf das Becken statthatte, ist nicht angegeben.

Bei meinen Versuchen über Beckenfestigkeit wurde die Prüfung in dem (Taf. I abgebildeten) Theile der Werder'schen Maschine für Druckfestigkeit vorgenommen, und die Belastung meist von 20 zu 20 kg gesteigert.

Der Bruch erfolgte in der Regel ganz ruhig und ohne Krachen, und sein Beginn war hauptsächlich an der auftretenden Dislocation der Fragmente und dem Sinken der Wage zu erkennen. Trotz oft starker Verschiebung der Bruchstücke kehrten nach dem Aufhören des Druckes die Knochen meist fast vollständig in ihre alte Lage wieder zurück.

Die Prüfung hatte in dreifacher Weise stattgefunden.

[1] l. c.

1) Druck in der Richtung von vornen nach hinten. Symphysis pubis zum Kreuzbeine.

Bei dieser Art der Beanspruchung wurden die das Foramen obturatorium nach innen zu umrandenden schwachen Knochenbrücken des horizontalen und absteigenden Schambeinastes nach innen getrieben, und der Bruch erfolgte meist beiderseitig und symmetrisch an dem Schambeinkörper und dem absteigenden Schambeinaste (Taf. VIII, Fig. 9) oder an beiden Schambeinästen nahe der Uebergangsstelle in das Darm- und Sitzbein.

Bei dem schon mehrfach erwähnten, wenig entwickelten 18jährigen Individuum fand der Bruch schon bei einer Belastung von 80 kg statt. Bei 9 weiteren erwachsenen Personen waren die Bruchbelastungen:

		Männer.				
Alter:	Jahre	24	27	30	56	75
Bruchbelastung	in kg	290	200	300	280	275
		Weiber.				
Alter:	Jahre	25	34	60	82	
Bruchbelastung	in kg	300	250	175	170	

2) Druck in querer Richtung an der Crista ossis ilei angreifend.

Es erfolgte dabei regelmässig die Zerreissung der einen Symphysis sacro-iliaca durch Hebelwirkung, indem die betreffende Darmbeinschaufel durch die an der Crista angreifende Kraft nach innen umgeschlagen wurde.

Die dazu nöthigen Belastungen waren bei einem

	26jährigen Manne	48jährigen Manne	61jährigen Weibe
kg	155	220	160

3) Druck in querer Richtung in der Höhe der Acetabula.

Wegen der grossen Beweglichkeit zwischen Becken und Schenkel, welche ein fortwährendes Heraustreten des Beckens aus der Druckachse veranlasste, musste davon Umgang genommen werden, durch Einwirkung des Druckes auf die Trochanteren unter Belassung der Schenkelköpfe in den Pfannen einen Beckenbruch herbeizuführen.

Es wurde daher ein Ersatz in der Weise geschaffen, dass mittelst zweier Holzwürfel der seitliche Druck auf die Pfannen ausgeübt worden war.

Während der Kraftwirkung erhielt der Beckeneingang die Form eines Längsovals, indem die Schambeine spitzwinklig nach aussen vorgedrängt und die seitlichen Beckenpartieen einander stark genähert wurden.

In einem Falle war die Verkürzung des Querdurchmessers des Beckeneingangs gemessen worden. Die Annäherung der beiden am weitesten quer von einander abstehenden Punkte der Linea innominata bis zum Bruche betrug 27 mm.

Nachdem der Bruch eingetreten und die Belastung entfernt war, kehrte das Becken zum grössten Theile zu seiner alten Form zurück, und es blieb nur eine Veränderung dieses Durchmessers von 4 mm.

Der Bruch befand sich meist sowohl in dem vorderen als in dem hinteren Theile des Beckenringes.

In dem vorderen Theile waren entweder nur einseitig oder wie in mehreren Fällen doppelseitig und dann symmetrisch die horizontalen und absteigenden Schambeinäste nahe der Uebergangsstelle in die festeren Theile des Sitz- und Darmbeines gebrochen.

Einmal verlief ein den Schambeinkörper und horizontalen Schambeinast betreffender Riss direct in die Pfanne (Taf. IX, Fig. 1).

Die Verletzung im hinteren Beckenhalbringe fand sich mit Ausnahme eines Falles, in welchem eine Diastase der Symphysis sacro-iliaca eintrat, am Kreuzbeine, indem die vordere Wand desselben nahe der Verbindung mit dem Darmbeine von oben nach abwärts gebrochen erschien.

Der Bruch strebte gerne den Kreuzbeinlöchern zu, die schwachen Knochenbrücken zwischen denselben durchtrennend. (Siehe die Abbildungen auf Taf. IX.)

Die zum Bruche nöthigen Belastungen waren:

		Männer.				
Alter:	Jahre	18	24	29	49	62
Bruchbelastung	in kg	275	400	450	170	325
		Weiber.				
Alter:	Jahre	19	42	74		
Bruchbelastung	in kg	290	170	250		

Malgaigne[1] beschreibt unter dem Namen der „doppelten Verticalfractur des Beckens“ eine mit den von mir bei Querdruck auf die Acetabula erhaltenen Fracturen vollkommen identische Bruchform, und es dürfte so die Richtigkeit seiner Annahme, dass die Gewalt, um diese Fractur hervorzubringen, das Becken voll angreifen und zum grössten Theile auf den Trochanter treffen müsse, erwiesen sein.

Auch König[2] erwähnt die gleichen Bruchformen, nur ist er der Ansicht, dass diese Brüche durch Gewalteinwirkung in der Richtung von vornen nach hinten entständen.

Nie erhielt ich bei Druck in dieser Richtung einen Bruch in den hinteren festeren Beckentheilen, und ich kann (auch bei voller Würdigung der Verschiedenheit zwischen Druck und Stoss) nicht wohl glauben, dass die schwachen Schambeine einen die hinteren festen Partieen zertrümmernden Bruch auszuhalten und fortzuleiten im Stande seien.

Fassen wir die erhaltenen Zahlen noch kurz zusammen, so ergibt sich als Mittel der Bruchbelastung bei Erwachsenen Folgendes:

Bei Druck von vornen nach hinten war das

Mittel . . . . 250 kg — das Maximum . . . . 300 kg

„ Minimum . . . . 170 kg

Bei Querdruck an der Crista ossis ilei

Mittel . . . . 180 kg

Bei Querdruck in der Höhe der Acetabula

Mittel . . . . 290 kg — das Maximum . . . . 450 kg

„ Minimum . . . . 170 kg

Bei Querdruck in der Höhe der Pfannen hält somit, wie zu erwarten, das Becken entschieden mehr als bei Längsdruck. Die Symphysenzerreissung durch Querdruck auf den Darmbeinkamm erforderte in Folge ihrer Entstehung durch Hebelwirkung eine verhältnissmässig geringe Belastung.

---

[1] Traité des fractures et des luxations. Paris 1847, Tome I.

[2] Lehrbuch der spec. Chirurgie.

VI. Extremitäten.

1) Zugfestigkeit.

Ueber die zum Zerreissen ganzer Knochen erforderlichen Belastungen existiren ein paar Angaben von Wilson [1] und von Pajot [2].

Wertheim [3] hatte versucht, die Fibula durch Zug zum Bruche zu bringen; er stand aber davon ab, da die spongiösen Gelenkenden sich schon ziemlich frühzeitig von der compacten Substanz loslösten oder auch in Folge der Einspannung zerquetscht wurden, ohne dass ein eigentlicher Zerreissungsbruch stattfand.

Der zu den eigenen Versuchen benützte Theil der Werder'schen Maschine findet sich auf Taf. II, Fig. 1 abgebildet.

b ist ein auf Zug beanspruchter, in zwei eisernen Klauen *Z Z* festgehaltener Knochen. Die eine der Klauen befindet sich mit dem feststehenden Querkopfe *S*, die andere mit dem beweglichen Querstücke *R* in Verbindung, dessen Bewegung von links nach rechts die Zugstangen *P P* vermitteln (siehe auch die Figur auf Taf. I).

In ein paar Fällen, in welchen eine sichere Befestigung des Knochens in den Klauen *Z Z* durch eingelegte Eisenkeile erzielt werden sollte, erfolgte eine Zerquetschung der eingespannten Gelenkenden. Es wurde daher bei zwei weiteren Versuchen dieses Vorkommniss durch möglichste Vertheilung der Beanspruchung in der Einspannstelle zu vermeiden gesucht, und zu diesem Zwecke ein jedes Gelenkende in Gyps abgeformt, und nach diesen Formen Metallhülsen gefertigt, die in die Klauen eingeschoben, die Knochenenden vollständig umfassten.

Beide Male, bei einem Oberarme und einem Oberschenkel eines 25jährigen Mädchens gelang der Zerreissungsbruch vollständig.

Beim Oberarme war die Bruchbelastung 800 kg. Der Bruch lag nahe dem oberen Gelenkende und kann als ein sehr steil verlaufender Schrägbruch oder auch als ein Längsbruch angesehen werden (Taf. X, Fig. 1). Der Oberschenkel bedurfte zum Bruche einer Belastung von 1550 kg. Der Bruch befindet sich im unteren Fünftel des Knochens, nahe dem unteren Gelenkende und ist schräg verlaufend (Taf. X, Fig. 2).

Bei planimetrischer Bestimmung der Querschnittsgrösse der Compacta an der Bruchstelle fand sich dieselbe beim Oberarme 1,5 qcm, beim Oberschenkel 2,3 qcm betragend. Hieraus berechnet sich für den Oberarm eine Zugfestigkeit von 533 kg und für den Oberschenkel von 674 kg pro qcm.

Die Zahlen fielen wohl desshalb etwas niedrig aus, weil in Folge der natürlichen Krümmung der Knochen bei der Beanspruchung auf Zug zugleich eine geringe Anstrengung auf Biegung statthatte; sie stimmen wohl mit den Wertheim'schen, nicht aber mit den Rauber'schen Angaben überein.

Bei dem geringen praktischen Interesse, welches diese Versuche bieten, indem wohl niemals beim Lebenden durch Zug eine Knochenzerreissung, sondern stets eine Trennung der Gelenkverbindungen eintreten wird, wurden keine weiteren derartigen Experimente angestellt, zumal auch die Herstellung der Einspannvorrichtung eine sehr umständliche und zeitraubende war.

---

1 Lectures on the Structure and Diseases of the Bones and Joints. Lond. 1820.

2 Des lésions traumatiques, que le foetus peut éprouver pendant l'accouchement. Thèse Paris 1853.

3 l. c.

2) Druck- und Strebfestigkeit.

a) Druck auf die Mitte langer Röhrenknochen.

Derselbe war vermittelst zweier viereckiger, je 2 cm hoher Eisenprismen in dem Theile der Werder'schen Maschine für Druck ausgeübt worden, und es wurde dabei der Knochenschaft wie ein zwischen den Fingern zusammengepresstes Schilfrohr unter Entstehung ausgedehnter Längsfissuren eingedrückt. Das erste Auftreten dieser Fissuren war meist von einem mehr oder minder deutlichen, krachenden Geräusche und einem entschiedenen Sinken der Wagschale begleitet; hatten sich dann die beiden Knochenwände aneinander gelegt, so konnte bis zum völligen Durchquetschen des Knochens der Druck meist noch sehr hoch gesteigert werden.

Bis zum Auftreten der ersten Fissuren kamen in den wenigen in dieser Weise angestellten Versuchen folgende Belastungen in Anwendung:

		Oberarm.	Radius.	Ulna.	Femur.	Tibia.	Fibula.
31 jähriger Mann	kg	850	525	550	1300	600	300
24 jähriges Weib	kg	600	390	310	1100	650	310

Bei dem 31 jährigen Manne erfolgte die vollständige Durchquetschung der Mitte des Oberschenkels mit einer Belastung von 2900 kg, während die Tibia bei einer Belastung von 4100 kg noch nicht vollkommen durchtrennt erschien.

Auf Taf. X finden sich derartig erzeugte Längsbrüche abgebildet.

Bouisson[1] erhielt durch seitliche Hammerschläge auf die am Boden liegenden Knochen, sowie durch Einpressen derselben in einen Schraubstock die gleichen Fracturformen und wies nach, dass sie anatomisch an allen Knochen möglich sind, wenn sie auch klinisch wegen der Seltenheit einer ähnlichen Gewalteinwirkung nur ausnahmsweise zur Beobachtung kommen.

b) Zerknickung.

Die Versuche über Zerknickung, soviel ich weiss, die ersten, die an ganzen menschlichen Knochen angestellt wurden, kamen in dem auf Taf. I abgebildeten Theile der Werder'schen Maschine für Druck- und Strebfestigkeit zur Ausführung.

Bei der Einspannung wurde ganz besonders berücksichtigt, die Längsachse des Knochens genau in die Druckachse zu bringen. Die Belastung war je nach den Dimensionen des Probestückes mit 10—50 kg gesteigert worden.

Da bei Strebfestigkeitsversuchen die Art der Anlage des zu prüfenden Körpers eine grosse Rolle spielt und die zu erhaltenden Bruchbelastungen ganz wesentlich beeinflusst, so muss angegeben werden, dass zunächst bei zwei Oberarmen die Prüfung geschah, indem ihre beiden Gelenkenden in genau angepasste, abgegossene Formen von Hartblei eingelassen waren. In beiden Fällen erfolgte zuerst ein Einkeilen des Schaftes in den Kopf und darnach ein ausgedehnter Splitterbruch im unteren Drittel des Knochens, wobei die Fragmentstücke unter starkem Krachen nach allen Richtungen auseinanderflogen. Durch einen zehnfach vergrössernden Messapparat war (in ähnlicher Weise, wie diess später bei den Biegungsversuchen beschrieben werden soll) die Ausbiegung des Knochens in zwei aufeinander senkrecht stehenden Richtungen gemessen worden.

In beiden Fällen bog sich der Knochen bis zum Bruche in der Richtung nach innen und hinten aus.

Die betreffenden Versuche sind folgende:

---

[1] L'Union médicale 1850.

Oberarm eines Mannes in mittleren Jahren.

Belastung.	Ausbiegung nach innen.		Ausbiegung nach hinten.	
kg	mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm	mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
100	0,45	45	0,35	35
200	0,83	38	0,74	29
300	0,98	15	0,96	22
400	1,20	22	1,25	29
500	1,46	26	1,59	34
580	2,52	106	2,30	71

Bei 590 kg Belastung wurde der Schaft in den Kopf eingetrieben, wodurch der Knochen eine Verkürzung um 3 cm erfuhr. Der Messapparat für die Einbiegung wurde jetzt entfernt, und nachdem die Belastung auf 1200 kg gesteigert worden war, erfolgte der Splitterbruch im unteren Drittel des Knochens. (Die Bruchform siehe Taf. XI, Fig. 3.)

Oberarm eines 30 jährigen Weibes.

Belastung.	Ausbiegung nach innen.		Ausbiegung nach hinten.	
kg	mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm	mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
100	0,15	15	0,46	46
200	0,46	31	0,90	44
300	0,66	20	1,24	34
400	0,84	18	1,56	32
500	1,08	24	1,97	41
600	1,44	36	2,38	41
650	2,53	109	3,86	148

Bei dieser Belastung erfolgte durch Einschieben des Knochenschaftes in den Kopf eine Verkürzung des Oberarmes um 2 cm. Entfernung des Messapparates. Bei 775 kg Splitterbruch im unteren Drittel. (Taf. XI, Fig. 4.)

Bem. Die Belastung war bei beiden Versuchen mit 20 kg gesteigert worden. Der Kürze halber sind hier für die Einbiegung grössere Intervalle gebracht.

Da einerseits die Herstellung der Metallgesenke äusserst zeitraubend war, andererseits diese Beanspruchung den Verhältnissen der Knochen in der Wirklichkeit durchaus nicht entsprach, so wurden bei den weiteren Versuchen die Knochenenden zur gleichmässigen Anlagerung und Vertheilung des Druckes nur mehr mit Filz unterpolstert, zugleich von einer Messung der Ausbiegung Umgang genommen, während des Ganges der Versuche aber jede merkbare Veränderung notirt.

Bei einer grossen Anzahl der geprüften Knochen erfolgte der Bruch nicht an der durch die Beanspruchung am meisten gefährdeten Stelle der Mitte, sondern durch Zusammendrücken und Zusammenquetschen an dem einen oder dem anderen der zunächst gedrückten Enden. Wo die Fractur im Schafte des Knochens stattfand, geschah sie meist plötzlich und mit Krachen.

Clavicula. 19 Versuche.

Während des Druckes nahmen, wie sich mit freiem Auge deutlich erkennen liess, die natürlichen Krümmungen des Schlüsselbeines, namentlich die innere Krümmung zu, und ausserdem erfolgte eine manchmal ziemlich beträchtliche Biegung des ganzen Knochens nach aufwärts. Der Bruch fand von den 19 Fällen 12 mal

im Mittelstücke nahe der Mitte statt, 7 mal durch Zusammenschieben oder Abquetschen des einen oder anderen Gelenkendes.

Die erhaltenen Bruchbelastungen sind folgende:

Männer.

Alter:	Jahre	18	24	26	31	33		49		75
						r.	l.	r.	l.	
Bruch nahe der Mitte:	kg	200	—	270	230	—	—	125	135	—
Bruch an dem einen Ende:	„	—	230	—	—	160	170	—	—	100

Weiber.

Alter:	Jahre	17	18		25	34	45	58		74	82
			r.	l.				r.	l.		
Bruch nahe der Mitte:	kg	110	100	85	210	150	125	—	—	—	90
Bruch an dem einen Ende:	„	—	—	—	—	—	—	110	115	110	—

Taf. X, Fig. 6—9 zeigt Strebfestigkeitsbrüche der Clavicula.

Ein paar Mal fand bei dieser Beanspruchung in Folge der natürlichen Krümmung der Clavicula eine Drehung des Knochens um seine eigene Axe statt, und die Bruchform (Fig. 9) war dann entsprechend jener bei den Torsionsversuchen beobachteten (s. u.).

Humerus. 18 Versuche.

Nur in einem einzigen Falle erfolgte ein und zwar querer Schaftbruch im unteren Drittel des Knochens (Taf. XI, Fig. 5), 8 mal fand der Bruch am Kopfe, 9 mal unmittelbar über der Rolle statt.

Bei fast allen Knochen wurde, nachdem das eine Gelenkende in dieser Weise zerstört war, der Druck noch fortgesetzt, bis auch am anderen der Bruch eintrat.

Die Bruchbelastungen sind:

Männer.

Alter:	Jahre	18	24	26	33	43	47		49	67
							r.	l.		
Zusammenquetschen des Kopfes:	kg	—	800	—	525	640	220	—	525	475
Abquetschen der Rolle:	„	410	—	650	—	—	—	300	—	—
und bei Fortsetzung des Versuchs										
Zusammenquetschen des Kopfes:	„	675	—	810	—	—	—	—	—	—
Bruch oberhalb der Rolle:	„	—	825	—	625	730	230	—	550	650

Weiber.

Alter:	Jahre	17	19	25	30	34	45		74	82
							r.	l.		
Bruch im unteren Drittel:	kg	—	—	—	600	—	—	—	—	—
Zusammenquetschen des Kopfes:	„	—	—	—	—	325	—	—	—	250
Abquetschen der Rolle:	„	375	250	520	—	—	450	500	275	—
bei Fortsetzung des Versuchs										
Zusammenquetschen des Kopfes:	„	530	320	670	640	—	575	600	275	—
Bruch oberhalb der Rolle:	„	—	—	—	—	325	—	—	—	—

Die Fractur am Kopfe bestand entweder in einer Einkeilung des Schaftes in den Kopf (Taf. X, Fig. 10; Fig. 11 zeigt eine solche Fractur auf dem Längsschnitte) oder in einem theilweisen Abbrechen des Kopfes vom Schafte (Fig. 12).

Auch am unteren Ende fand entweder ein Abbrechen der Rolle (Taf. XI, Fig. 1) oder eine Einkeilung des Schaftes in dieselbe statt (Fig. 2).

Radius. 17 Versuche.

Die Ausbiegung bis zum Bruche erfolgte fast in allen Fällen entsprechend der natürlichen Krümmung des Radius nach aussen, sehr oft war zudem noch eine mehr oder weniger bedeutende Biegung bald nach vornen, bald nach rückwärts bemerkbar. 13mal kam der Bruch in der Mitte der Diaphyse zu Stande, 2mal wurde das Radiusköpfchen zusammengeschoben (Taf. XI, Fig. 6), 2mal erfolgte der Bruch am unteren Gelenkende (Taf XI, Fig. 7).

Die Versuche sind folgende:

Männer.

Alter:	Jahre	18	24	25	33	47 r.	47 l.	55	67
Bruch nahe der Mitte:	kg	275	360	430	300	—	—	400	240
Zusammenquetschen des Köpfchens:	„	—	—	—	—	150	120	—	—

Weiber.

Alter:	Jahre	17	19	25	30	34	45 r.	45 l.	74	82
Bruch nahe der Mitte:	kg	155	105	325	230	250	240	235		
Bruch des unteren Endes:	„	—	—	—	—	—	—	—	150	130

Diaphysenbrüche des Radius fanden sich auf Taf. XI Fig. 8—11.

Ulna. 17 Versuche.

Am oberen Gelenkende fand der Druck auf das Olecranon statt. Während der Beanspruchung bog sich die Ulna nach hinten aus und zugleich in geringerem Grade entweder nach innen oder aussen. 8mal wurde das untere Gelenkende zusammengequetscht (Taf. XI, Fig. 12), 9mal erfolgte der Bruch in der Diaphyse. In letzterem Falle lag die Bruchstelle meist etwas unter der Mitte des Knochens, ein paar Mal im unteren Sechstel, im schwächsten Querschnitte. (Taf. XI, Fig. 18 Infraction an dieser Stelle.)

Männer.

Alter:	Jahre	18	24	25	33	47 r.	47 l.	55	67
Bruch des Schaftes:	kg	180	—	290	—	—	—	205	—
Zusammenquetschen des unteren Endes:	„	—	400	—	175	125	115	—	160

Der Druck in der Längsrichtung des Schaftes noch weiter fortgesetzt bis zum Zusammenquetschen des Olecranons: kg 350 200 230 — —

Weiber.

Alter:	Jahre	17	19	25	30	34	45 r.	45 l.	74	82
Bruch des Schaftes:	kg	90	95	175	175	—	125	125	—	—
Zusammenquetschen des unteren Endes:	„	—	—	—	—	120	—	—	90	100

Fig. 13 auf Taf. XI zeigt einen Bruch des Olecranons, die Fig. 14—17 Diaphysenbrüche der Ulna.

Femur. 15 Versuche.

Indem am oberen Knochenende der Druck auf den Schenkelkopf angebracht worden war, erfolgte die Ausbiegung des Femur bis zum Bruche in der Richtung nach vornen und zugleich nach aussen.

Ein Schaftbruch etwas oberhalb der Mitte des Knochens kam nur bei vier jugendlichen Individuen zu Stande und zwar waren diese Schaftbrüche (trotz der indirecten Einwirkung der Gewalt) ausgedehnte Splitterbrüche (Taf. XII, Fig. 4 und 5), wobei unter bedeutendem Krachen die Bruchstücke mit grosser Gewalt im ganzen Laboratorium umhergeschleudert wurden. Zweimal fand der Bruch am unteren Gelenkende, in allen übrigen Fällen am Schenkelhalse statt. Die Versuche sind folgende:

Männer.

Alter:	Jahre	18	24	25	26	33	47 r.	47 l.	49	67
Bruch nahe der Mitte:	kg	—	700	—	875	—	—	—	—	—
Bruch des Schenkelhalses:	„	775	—	1075	—	800	—	—	725	700
Bruch des unteren Gelenkendes:	„	—	—	—	—	—	425	400	—	—
Bei Fortsetzung des Druckes in der Schaftrichtung (nach Absägen des Knochens unterhalb der schon vorhandenen Bruchstelle) erfolgte ein										
Bruch des untern Endes mit	kg	1975	—	—	2500	—	—	—	850	1300

Weiber.

Alter:	Jahre	17	25	34	45	74	82
Bruch nahe der Mitte:	kg	575	875	—	—	—	—
Bruch des Schenkelhalses:	„	—	—	600	600	425	400
Bei Fortsetzung des Versuchs Bruch am unteren Ende:	„	1050	—	—	975	—	—

Bei den auf diese Weise erzeugten Schenkelhalsbrüchen hatte die Bruchlinie nur ein einziges Mal einen zur Richtung des Schenkelhalses rechtwinkligen Verlauf (Taf. XI, Fig. 19), bei allen übrigen Brüchen des Halses war sie direct von oben nach abwärts gehend (wie in Fig. 20 auf Taf. XI). Einen unvollständigen derartigen Bruch stellt Fig. 2 auf Taf. XII vor; derselbe entstand bei dem 47jährigen Manne.

Der Bruch am unteren Gelenkende zeigte sich entweder als eine Schafteinkeilung (Taf. XI, Fig. 21) oder als ein Splitterbruch (Taf. XII, Fig. 1). Bei dem 24jährigen Manne erfolgte, als eine solche Zusammenquetschung am unteren Ende durch Längsdruck auf ein 32 cm langes Stück des Knochens hervorgebracht werden sollte, eine Infraction des Oberschenkels in seinem unteren Drittel (Taf. XII, Fig. 3).

Tibia. 17 Versuche.

Es war beabsichtigt worden, die Tibia auf ihrer natürlichen Unterlage in Verbindung mit dem ganzen Fusse zu prüfen. Wegen fortwährenden Herausspringens des Probestückes aus dem Apparate liessen sich aber die Versuche auf solche Weise nicht zu Ende führen. Der Fuss wurde daher jedesmal abgetrennt, und nur mehr der Talus zur Aufnahme für das untere Gelenkende der Tibia benützt. Brach er früher als die Tibia, so kam eine dem natürlichen Talus nachgebildete Form von Holz oder Hartblei zu gleichem Zwecke in Verwendung.

Das obere Gelenkende war wie bei allen anderen Knochen einfach mit Filz gut unterpolstert.

Ein Bruch der Diaphyse kam in keinem Falle zu Stande, sondern der Bruch erfolgte regelmässig am unteren Ende des Knochens (Taf. XII, Fig. 7); nur ein einziges Mal wurde zuerst das obere Gelenkende zusammengequetscht.

Die Belastungen waren folgende:

Männer.

Alter:	Jahre	18	24	25	26	31	33	49	59	67
Zusammenquetschen des unteren Endes:	kg	850	1575	1675	1400	1075	725	750	720	750

Der Druck wurde nun meist fortgesetzt, bis das Zusammenquetschen des unteren Endes aufhörte, und nun begann ein

Zusammenschieben des oberen Gelenkendes:	kg	—	1975	—	1400	—	—	800	720	750

Bei dem 26jährigen Manne erfolgte der Bruch des Talus mit 1050 kg Belastung.

Weiber.

Alter:	Jahre	17	18	25	34	45 r.	45 l.	74	82
Bruch des unteren Gelenkendes:	kg	825	1060	900	675	700	690	500	—
Zusammenquetschen des oberen Endes:	„	—	—	—	—	—	—	—	450
Bruch des Talus:	„	Talus unverletzt	—	Talus unverletzt	—	—	—	425	Talus unverletzt
Fortsetzung des Versuchs, Zusammenquetschen des oberen Endes:	„	975	1180	—	675	750	720	—	—

Der Bruch am oberen Ende der Tibia bestand regelmässig in einer Einkeilung des Schaftes in dieses Gelenkende (Taf. XII, Fig. 6).

Fibula. 16 Versuche.

Bis zum Bruche erfolgte eine meist sehr starke Ausbiegung nach innen und hinten. Mit Ausnahme eines Falles, in welchem das obere Ende abgequetscht wurde, erfolgte der Bruch in der Diaphyse und zwar meist im oberen oder unteren Drittel des Knochens (Taf. XII, Fig. 8—10), einmal nahe dem oberen Ende an einer sehr schwachen Stelle (Taf. XII, Fig. 11) und einmal an zwei Stellen zugleich, in der Mitte (der bei der Beanspruchung am meisten gefährdeten Stelle) und im oberen Drittel (im schwächsten Querschnitte).

Männer.

Alter:	Jahre	18	24	25	26	31	33	59	67
Bruch der Diaphyse:	kg	25	90	60	75	45	50	—	80
Bruch des unteren Endes:	„	—	—	—	—	—	—	45	—

Weiber.

Alter:	Jahre	17	18	25	34	45 r.	45 l.	74	82
Bruch der Diaphyse:	kg	45	50	85	55	40	65	20	30

Bei Zusammenstellung der erhaltenen Bruchbelastungen ergibt sich nachstehende Tabelle.

Tabelle der Bruchbelastungen in Kilo bei Beanspruchung auf Strebfestigkeit.

	Alter.	Clavicula. Diaphysen-Bruch.	Humerus. Bruch des Schaftes.	Humerus. Bruch des Kopfes.	Humerus. Bruch der Rolle.	Radius. Diaphysen-Bruch.	Ulna. Diaphysen-Bruch.	Femur. Bruch des Schaftes.	Femur. Bruch des Halses.	Tibia. Bruch des unteren Endes.	Fibula. Diaphysen-Bruch.
Männer.	18	200	—	—	410	275	180	—	775	850	25
	24	—	—	800	—	360	—	750	—	1575	90
	25	—	—	—	—	430	290	—	1075	1675	60
	26	270	—	—	650	—	—	875	—	1400	75
	31	230	—	—	—	—	—	—	—	1075	45
	33	—	—	525	—	300	—	—	800	725	50
	43	—	—	640	—	—	—	—	—	—	—
	47 r.	—	—	220	—	—	—	—	—	—	—
	47 l.	—	—	—	300	—	—	—	—	—	—
	49	r. 125 l. 135	—	525	—	—	—	—	725	750	—
	55	—	—	—	—	400	205	—	—	—	—
	59	—	—	—	—	—	—	—	—	720	—
	67	—	—	475	—	240	—	—	700	750	80
Weiber.	17	110	—	—	375	155	90	575	—	825	45
	18	r. 100 l. 95	—	—	—	—	—	—	—	1060	50
	19	—	—	—	250	105	95	—	—	—	—
	25	210	—	—	520	325	175	875	—	900	85
	30	—	600	—	—	230	175	—	—	—	—
	34	150	—	325	—	250	—	—	600	675	55
	45 r.	125	—	—	450	240	125	—	—	700	40
	45 l.	—	—	—	500	235	125	—	600	690	65
	58	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	74	—	—	—	275	—	—	—	425	500	20
	82	90	—	250	—	—	—	—	400	—	30

Sehen wir zunächst von den durch Zerdrücken und Abdrücken entstandenen Brüchen der Gelenkenden ab und stellen wir die Schaftbrüche zusammen, so ergibt sich für Mittel, Maximum und Minimum der Belastung Folgendes:

		Clavicula.	Humerus.	Radius.	Ulna.	Femur, Diaphyse.	Femur, Hals.	Fibula.
Männer.		(5 Zahlen)	—	(6 Zahlen)	(3 Zahlen)	(2 Zahlen)	(5 Zahlen)	(7 Zahlen)
Mittel	kg	192	—	334	—	—	815	61
Maximum	„	270	—	430	290	875	1075	90
Minimum	„	125	—	240	180	700	700	25
Weiber.	„	(7 Zahlen)	(1 Zahl)	(7 Zahlen)	(6 Zahlen)	(2 Zahlen)	(4 Zahlen)	(8 Zahlen)
Mittel	„	126	600	220	132	—	506	49
Maximum	„	210	—	325	175	875	600	85
Minimum	„	90	—	105	90	575	400	20

Für Oberarm und Tibia waren die Belastungen, welche den Bruch an dem einen Ende herbeiführten, folgende:

Oberarm	bei	Männern	im	Maximum	. . .	kg	800
„	„	„	„	Minimum	. . .	„	220
„	„	Weibern	„	Maximum	. . .	„	520
„	„	„	„	Minimum	. . .	„	250
Tibia	„	Männern	„	Maximum	. . .	„	1650
„	„	„	„	Minimum	. . .	„	720
„	„	Weibern	„	Maximum	. . .	„	1060
„	„	„	„	Minimum	. . .	„	450

Für den Widerstand der Röhrenknochen gegen Zerknickung haben wir somit folgende Skala mit abnehmender Festigkeit: Tibia, Oberschenkel, Humerus, Radius, Ulna, Clavicula, Fibula.

NB. Die geringere Tragfähigkeit der Ulna gegenüber dem Radius ist hauptsächlich durch die grössere Länge (wegen Drucks auf das Olecranon) derselben verursacht.

Bezüglich des Einflusses der Form der Extremitätenknochen auf die Strebfestigkeit soll hier erwähnt werden, dass die natürlichen Krümmungen, welche viele Knochen z. B. der Oberschenkel und Radius besitzen, und welche sie so geeignet machen, Stösse, die den Knochen in der Richtung seiner Längsachse treffen, abzuschwächen, einen sehr nachtheiligen Einfluss auf die Strebfestigkeit haben. Denn durch diese gekrümmte Form werden die bei Anstrengung auf Strebfestigkeit ohnehin auftretenden Biegungen, welche auch die Veranlassung zum Bruche sind, ungemein befördert.

Andererseits wirken wieder mehrere Momente, welche in der Form des Knochens sich finden, so die Hohlcylindergestalt, das bedeutende Anwachsen der Querschnittsdimensionen nach den Gelenkenden zu einer Ausbiegung entgegen und sind desshalb für die Tragfähigkeit günstig.

Mehrfach, so beim Radius und am Oberschenkelhalse findet sich in der Richtung der Krümmung eine entsprechende Vergrösserung des Querdurchmessers, wodurch gleichfalls die Ausbiegung nach dieser Richtung hin eingeschränkt wird.

Aber obwohl gerade am Oberschenkelhalse, wie wir durch die schönen Untersuchungen von Meyer,[1] Wolff[2] und Merkel[3] wissen, sich viele Momente auffinden lassen, welche auf eine grosse Tragfähigkeit hin-

---

[1] Die Architektur der Spongiosa. Archiv von Reichert und Du Bois-Reymond 1867.

[2] Archiv für pathol. Anatomie. Bd. 50.

[3] Betrachtungen über das Os femoris. Archiv für path. Anatomie. Bd. 59.

deuten, ist es doch der vorhandenen Krümmung hauptsächlich zuzuschreiben, dass in Bezug auf Strebfestigkeit der Oberschenkel entschieden von der Tibia übertroffen wird. Allerdings ist auch seine grössere Länge hiebei zu berücksichtigen, welche gleichfalls festigkeitsvermindernd wirkt.

In Folge der auftretenden Biegung wird bei einem freistehenden und auf Zerknickung beanspruchten Stabe die Mitte am meisten angestrengt und es erfolgt hier der Bruch.

Auch bei den Knochen trat in sehr vielen Fällen in der Mitte der Bruch ein und er lag nur dann an einer anderen Stelle, wenn diese durch eine besonders schwache Querschnittsdimension die nächste Veranlassung zum Bruche gab.

Da in vielen Fällen, namentlich bei älteren Personen der Bruch durch Zusammenschieben der Gelenkenden erfolgte, war es klar, dass in dem gleichen und in noch höherem Grade, als die Knochen an ihren Gelenkenden eine Volumszunahme erfahren, durch das Auftreten der Spongiosa sich die Festigkeit vermindert.

Durch eine solche Anordnung festerer Masse bei kleinerem Querschnitte in der Mitte der Röhrenknochen und schwächerer Substanz an den vergrösserten Enden wird die Tragfähigkeit eine ziemlich gleiche in den verschiedenen Durchmessern.

Es braucht kaum erwähnt zu werden, dass für den Mechanismus der Knochenbrüche beim Lebenden z. B. bei einem Falle auf die Hand etc. die Strebfestigkeit eine grosse Bedeutung hat.

c) Druck in der Richtung des Oberschenkelhalses.

Da die meisten Schenkelhalsbrüche durch Einwirkung der Gewalt in dieser Richtung entstehen, so sollte in derselben die Widerstandsfähigkeit des Schenkelhalses einer Prüfung unterzogen werden.

Es war ziemlich schwierig, den Oberschenkelkopf und Hals in der Druckrichtung sicher zu befestigen, und von den mehrfach angestellten Versuchen gelangen nur einige vollständig.

Bei einem 25jährigen Mädchen wurde bei dieser Art der Beanspruchung der Schenkelkopf vollständig auseinander gedrückt dadurch, dass der Hals, der unverletzt blieb, in den Kopf eingeschoben wurde. Die Belastung dabei war 1350 kg.

Von den übrigen Fällen erfolgte der Bruch einmal, bei einem 50jährigen Manne zwischen Kopf und Hals (Taf. XII, Fig. 12) bei einer Belastung von 550 kg.

Bei drei weiteren Oberschenkeln lag er zwischen Schaft und Hals des Knochens (Taf. XII, Fig. 13). Die zum Bruche nöthigen Belastungen waren:

bei einem	32jährigen	Weibe	. . . . .	850 kg
„ „	78 „	Manne	. . . . .	850 „
„ „	82 „	Weibe	. . . . .	450 „

Bem. Der 78jährige Mann hatte enorm massive Knochen. Vergleiche den von der Mitte desselben Oberschenkels genommenen Querschnitt auf Taf. XVI.

Die Bruchbelastungen bei dieser Art der Prüfung stimmen mit den Werthen, wie sie zum Bruche des Oberschenkels bei den Versuchen über Zerknickung erforderlich waren, überein.

d) Patella.

Ich hatte zuerst versucht, auf die Patella in ihrer natürlichen Verbindung mit dem Kniegelenke einen Druck von vornen nach hinten auszuüben.

Dabei wurde aber der Knochen entweder tief in die Spongiosa des Oberschenkels eingedrückt, ohne dass ein Patellarbruch erfolgte, oder die Patella wirkte wie ein Keil, indem die Gelenkkapsel sammt den Bändern zwischen Oberschenkel und Tibia entzwei gerissen wurden.

Bei den weiteren Versuchen prüfte ich daher die Kniescheibe für sich allein, indem ich ihre hintere Fläche mit Filz unterpolsterte, während der Druck auf die vordere Fläche statthatte.

Nachstehend die Bruchbelastungen:

Männer.

Alter:	Jahre	18	26	28	31	32		75	78
Körperseite:		R	L	L	L	R	L	L	L
Bruchbelastung:	kg	250	775	600	600	525	525	525	600

Weiber.

Alter:	Jahre	20	25	32	34	51	60	74	81
Körperseite:		R	L	R	R	L	L	L	L
Bruchbelastung:	kg	325	525	425	600	325	500	400	225

Das unentwickelte, 18jährige männliche Individuum ausgenommen, ergibt sich für die Bruchbelastungen erwachsener Personen

bei	Männern	als	Mittel	kg	600
„	„	„	Maximum . .	„	775
„	„	„	Minimum . .	„	525
„	Weibern	„	Mittel	„	420
„	„	„	Maximum . .	„	600
„	„	„	Minimum . .	„	225

Mit den Zahlen stimmt auch die Belastung von 550 kg überein, durch welche Weber[1] die Patella an der unversehrten Leiche eines 37jährigen Weibes zerbrach.

Die Bruchform war ausnahmslos ein die Patella halbirender Längsriss (Taf. XII, Fig. 14).

3) Biegungselasticität und Festigkeit.

Die Biegung hat für uns besonderes Interesse, da eine grosse Anzahl der Knochenbrüche des Lebenden durch sie zu Stande kommt.

Versuche über die Belastungen, welche zum Zerbrechen ganzer Knochen durch Biegung nöthig sind, wurden meines Wissens nur von C. O. Weber[1] angestellt. Weber benützte dazu einen dem Dysmorphosteopalinklasten von Blasius nachgebildeten Knochenzerbrechungsapparat, in welchen das zu untersuchende, un-

[1] l. c.

versehrte und noch mit dem ganzen Körper in Verbindung stehende Glied befestigt wurde. In dem Apparate war ein Dynamometer eingeschaltet, das die Kraft von 25 zu 25 kg bis 600 kg anzeigte. Die angestellten Versuche erstrecken sich auf 59 Knochen von 4 Männern und 5 Weibern, wobei für die gleichnamigen Knochen der verschiedenen Personen eine gleichgrosse Ausbiegungsstützweite genommen worden war.

Die Bruchbelastungen waren im Mittel:

		Oberschenkel.	Tibia.	Oberarm.	Ulna.	Clavicula.
Bei Männern	kg	497	312	362	225	129
„ Weibern	„	406	237	230	121	107
Distanz der unterstützten Punkte	cm	18,3	21,6	13,0	11,8	lag auf dem Körper.

Weber zieht nun aus den erhaltenen Zahlen Folgerungen über die Festigkeit in verschiedenen Altern und bei verschiedenen Knochen, welche gänzlich unstatthaft sind. Die Knochendimensionen verschiedener Individuen bieten nämlich so grosse Unterschiede, dass nur bei Berechnung auf die Einheit solche Schlüsse gemacht werden können. Auch die von Weber erhaltenen Bruchbelastungen der verschiedenen Knochen eines einzelnen Individuums lassen sich nicht ohne weiters mit einander vergleichen, da ja die von ihm gewählten Stützweiten willkürliche und nicht in einem bestimmten Verhältnisse zu einander stehende sind.

Meine eigenen Versuche über Biegungselasticität und Festigkeit wurden in den meisten Fällen mit der Werder'schen Maschine angestellt. Die für die Prüfung benützte Vorrichtung ist uns schon von den Schädelversuchen her zum grössten Theile bekannt.

Sie ist auf Tafel II, Fig. 2 abgebildet.

Der zu prüfende Knochen ruht mit seinen beiden Enden auf zwei kleinen Platten, die an die Winkel *d d* festgemacht sind, und der Druck wird durch die Kante eines an die Stirnwand des Wagens *A* angeschraubten Keiles *k* auf die Mitte des Probestückes ausgeübt. Die Winkel *d d* sind zur möglichst genauen Anlagerung der beiden Knochenenden nach aussen zu in geringem Grade abgeschrägt; ein Falz im Querbalken *C* ermöglicht ferner eine Verstellbarkeit dieser Winkel, so dass nach Bedürfniss eine verschieden lange Stützweite für die Biegung genommen werden konnte.

Die bei der Bewegung des Wagens *A* auf den Schienen *m* stattfindende Reibung wurde wie bei den Schädelversuchen jedesmal eliminirt.

Zur Messung der Einbiegung fand sich in der Mitte des Knochens, der drückenden Kante gegenüber ein Metallhacken festgeklemmt (Fig. 3 zeigt in natürlicher Grösse einen solchen Hacken auf dem Querschnitte eines Oberarmes), von welchem aus ein gut ausgezogener, sich nicht mehr verlängernder Faden durch den Schlitz des Balkens *C* hindurch zu einer Messvorrichtung ging. Diese befand sich an dem festen Gestelle *H* der Maschine angeschraubt und gab jede Veränderung des Knochens in zehnfach vergrösserter Uebersetzung wieder, ein mm Veränderung zeigte sich also auf dem Messapparate als cm.

In Fig. 4 ist dieser Messapparat nochmals besonders abgebildet.

Durch ein Gewichtchen wird der über die Rolle gehende und am Knochen befestigte Faden gespannt erhalten. Die Rolle, welche sich auf diese Weise bei jeder Veränderung des Knochens drehen muss, hat dieselbe Axe wie der Zeiger des Apparates. Die zehnfache Uebersetzung ist erzielt dadurch, dass die Länge des Zeigers bis zur Skala zehnmal so gross ist als der Radius der Rolle.

Während die Belastungen je nach den Dimensionen des Probestückes mit 10 oder 20 kg gesteigert wurden, sind in der nachfolgenden Aufführung der Versuche der Kürze halber die Ablesungen sehr oft in grösseren Intervallen angegeben.

Mit ganz besonderer Sorgfalt wurde darauf gesehen, an den Anlagepunkten des Knochens jede Drehung oder Verschiebung zu verhindern. Kleine an den Anlagestellen untergelegte Eisenkeile leisteten in dieser Hinsicht gute Dienste, auch war hier selbstverständlich das Periost entfernt worden.

Mehrmals während eines Versuchs ging ich zur Nullstellung zurück, theils um die Anlagerung zu controliren, theils um die bleibenden Veränderungen zu messen. Letztere sind nachstehend nicht mit aufgeführt, da sie meistens, wenigstens beim Beginne eines Rückstandes als verschwindend klein innerhalb der Grösse der unvermeidlichen Versuchsfehler fielen. Denn trotz grosser Aufmerksamkeit war es bei der den Knochen eigenthümlichen Gestalt doch nicht immer möglich, jede geringste Aenderung in der Anlage, welche auf die Messung von Einfluss sein musste, zu verhindern.

Nach jeder Steigerung der Belastung wurde kurze Zeit gewartet bis der Zeiger des Messapparates zur Ruhe kam und dann erst die Ablesung gemacht. Versuche mit lang andauernder Belastung sind nicht vorgenommen worden.

Bei Anwendung der Werder'schen Maschine für die Prüfung der Fibula konnten, der geringen Dimensionen letzterer wegen, bis zum Bruche nur drei bis vier Ablesungen der Einbiegung gemacht werden. Da es aber doch wünschenswerth erschien, auch für diesen Knochen mehrere Ablesungen zu besitzen, so wurde er in vielen Fällen nicht mit der Werder'schen Maschine, sondern durch directe Belastung mittelst angehängter Gewichte geprüft.

Der dazu benützte Apparat ist auf Taf. III, Fig. 4 abgebildet und leicht verständlich.

Auf den verstellbaren und nach aussen zu etwas abgeschrägten Winkeln *d d* ruht der zu prüfende Knochen. In seiner Mitte befindet sich ein Hacken, an welchem zu Anfang des Versuchs die Gewichte direct angehängt wurden, späterhin die Wagschale zur Aufnahme der höheren Belastungen. Die leere Wagschale und der Hacken waren zusammen 8 kg schwer, ein Gewicht, welches also den aufgelegten Belastungen zuzuzählen war. Der Messapparat für die Einbiegung befand sich oberhalb des Knochens an einem U förmigen Eisenstücke festgemacht.

Bei den geprüften Stücken erfolgte (mit Ausnahme eines einzigen Falles) in der Mitte des Knochens, dem Angriffspunkte der Kraft der Bruch. Derselbe entstand in den meisten Fällen unter Krachen durch Zerreissung der Knochenfasern auf der convexen Seite bei der Biegung und nur in einigen Fällen ging dieser Zerreissung eine Zerdrückung des Knochens auf der concaven Seite, der Stelle der Gewalteinwirkung voraus.

Bei diesen Knochen entstand also vor dem Zerreissungsbruche eine manchmal beträchtliche Einknickung, die für die Totalausbiegung ungemein hohe Zahlen gab. Bei den betreffenden Versuchen ist diess jedesmal besonders angeführt.

Die Stützweite für die Ausbiegung war anfänglich, wie es Weber that, in derselben Grösse für die gleichnamigen Knochen verschiedener Personen gewählt worden. Da jedoch auf diese Weise die Zahlen nur nach weiterer Umrechnung, wie schon früher erwähnt, mit einander vergleichbar sind, so wurde, um die erhaltenen Bruchbelastungen so viel als möglich unmittelbar vergleichbar zu machen, für die weiteren Versuche immer $^2/_3$ der Länge des ganzen Knochens als Stützweite genommen.

Clavicula.

Angriffspunkt der Kraft auf die vordere Kante (Druck von vornen nach hinten).

Bei der eigenthümlich gekrümmten Form des Schlüsselbeines mussten als Anlagepunkte für die Biegung einerseits das innere Gelenkende, andererseits die Convexität der äusseren Krümmung benützt werden. Aus der Entfernung dieser Punkte ergab sich von selbst die Stützweite. Eine Verdrehung des Knochens konnte nur durch Einlassen des äusseren Endes in eine nach vornen offene Führung verhindert werden.

Versuchs-Nro.	Alter. Jahre.	Geschlecht.	Körperseite.	Stützweite. cm	Bruchbelastung. kg	Totalbiegung. mm	Bemerkungen.
1.	18	männliches unentwickeltes Individuum	R	9,5	50	10,9	
2.	24	Mann	L	12,5	90	16,0	Bei 9,0 mm Einbiegung Beginn von Knickung.
3.	32	Mann	R	11,2	115	10,0	
4.	49	Mann	R	11,7	100	5,3	
5.	75	Mann	R	11,0	80	6,8	
6.	78	Mann	L	13,5	95	7,9	
7.	20	Weib	R	11,0	60	6,2	
8.	24	Weib	L	12,0	65	9,7	
9.	32	Weib	R	12,0	70	9,5	
10.	51	Weib	L	11,3	60	8,0	
11.	74	Weib	L	11,0	65	10,1	Bei 6,3 mm Einbiegung Beginn von Infraction.
12.	82	Weib	R	11,5	50	6,2	
		Angriffspunkt der Kraft auf die obere Fläche (Druck von oben nach unten):					
13.	32	Mann	L	10,0	110	—	

Humerus.

Angriffspunkt der Kraft auf die vordere Kante (Druck von vornen nach hinten), Stützweite 16 cm:

Versuch 14. 38jähriger Mann. R.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
50	0,22	22
100	0,42	20
150	0,65	23
200	0,88	23
250	1,09	21
300	1,38	29
350	1,65	27
400 Bruch.	5,06	341

Versuch 15. 18jähriges Weib. R.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
20	0,50	50
40	0,93	43
60	1,40	47
80	1,85	45
100	2,25	40
120	2,60	35
140	3,05	45
160	3,79	74
180 Bruch.	10,2	64

Versuch 16. 18jähriges Weib. L.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
20	0,45	45
40	0,87	42
60	1,38	51
80	1,86	48
100	2,25	39
120	2,65	40
140	3,13	48
160	3,78	65
180 Bruch.	9,73	595

Angriffspunkt der Kraft auf die vordere Kante (Druck von vornen nach hinten), Stützweite = $^2/_3$ der Länge des Knochens:

Versuch 17. 18jähriges unentwickeltes männliches Individuum.
R. Stützweite 20 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
10	0,35	35
20	0,71	36
30	1,09	38
40	1,45	36
50	1,87 * [1]	42
100	4,19	232
110 Bruch.	12,03	784

Versuch 18. 24jähriger Mann.
L. Stützweite 24 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
50	0,90	90
100	1,82	92
150	2,70	88
200	3,65 *	95
250	4,85	120
300 Bruch.	10,85	600

Versuch 19. 32jähriger Mann.
R. Stützweite 22 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
50	0,60	60
100	1,22	62
150	1,83	61
200	2,53 *	70
250	3,16	63
300 Bruch.	8,65	549

Versuch 20. 49jähriger Mann.
R. Stützweite 22 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
50	0,83	83
100	1,67	84
150	2,59 *	92
200	3,66	107
240 Bruch.	7,27	321

Versuch 21. 75jähriger Mann.
R. Stützweite 22 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
50	0,77	77
100	1,58	81
150	2,37	79
200	3,44	107
240 Bruch.	5,15	171

Versuch 22. 78jähriger Mann.
L. Stützweite 22 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
50	0,50	50
100	1,00	50
150	1,53	53
200	2,21 *	68
250	3,03	82
300 Bruch.	4,53	150

[1] Das * bezeichnet die vom Beobachter angenommene Elasticitätsgrenze.

Versuch 23. 20jähriges Weib.
R. Stützweite 20 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
10	0,25	25
20	0,48	23
30	0,79	31
40	1,10	31
50	1,41	31
60	1,73	32
80	2,43 *	70
100	3,13	70
120	3,83	70
140	5,36	153
150 Bruch.	7,49	213

Versuch 24. 24jähriges Weib.
L. Stützweite 20 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
20	0,50	50
40	1,04	54
60	1,58	54
80	2,12	54
100	2,64	52
120	3,16	52
140	3,74 *	58
160	4,62	88
180	6,15	153
200 Bruch.	7,90	175

Versuch 25. 32jähriges Weib.
R. Stützweite 20 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
50	0,84	84
100	1,68	84
150	2,51	83
200	3,41	90
240 Bruch.	10,89	748

Versuch 26. 52jähriges Weib.
L. Stützweite 18 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
20	0,28	28
40	0,58	30
60	0,91	33
80	1,22	31
100	1,52	30
120	1,83	31
140	2,23 *	40
160	2,70	47
180	3,45	75
200	6,15	270

Versuch 27. 74jähriges Weib.
R. Stützweite 20 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
20	0,56	56
40	1,13	57
60	1,70	57
80	2,34 *	64
100	3,06	72
120 Bruch.	6,70	364

Versuch 28. 82jähriges Weib.
R. Stützweite 20 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
20	0,52	52
40	1,05	53
60	1,59	54
80	2,16 *	57
100	2,77	61
135	6,55	378

Angriffspunkt der Kraft auf die hintere Fläche (Druck von hinten nach vornen), Stützweite = $^2/_3$ der Länge des Knochens:

Versuch 29. 32jähriger Mann.
L. Stützweite 22 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
50	0,80	80
100	1,60	80
150	2,37	77
200	3,26 *	89
250	4,75	149
270 Bruch.	8,23	348

Bei 7,12 mm Einbiegung Beginn von Infraction, dann aber Krachen und Bruch.

Radius.

Angriffspunkt der Kraft auf die Crista radii (Druck von hinten nach vornen), Stützweite 12 cm:

Versuch 30. 38jähriger Mann. L.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
20	0,30	30
40	0,55	25
60	0,86	31
80	1,14	28
100	1,43	29
120	1,73	30
140	2,17	44
160	2,58	41
180 Bruch.	8,19	561

Angriffspunkt der Kraft auf die innere Fläche (Druck von innen nach aussen), Stützweite = $^2/_3$ der Länge des Knochens:

Versuch 31. 18jähriges kindliches Individuum.
R. Stützweite 14 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
10	0,62	62
20	1,25	63
30	1,87	62
40	2,60 *	73
50	3,40	80
60	5,05	165
65 Bruch.	14,95	990

Versuch 32. 24jähriger Mann.
L. Stützweite 16 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
20	0,70	70
40	1,30	60
60	2,00	70
80	2,70	70
100	3,50	80
120	4,40	90
140 Bruch.	14,15	975

Versuch 33. 32jähriger Mann.
R. Stützweite 16 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
20	0,65	65
40	1,27	62
60	1,92	65
80	2,73 *	81
100	3,78	105
120 Bruch.	9,28	550

Versuch 34. 49jähriger Mann.
R. Stützweite 16 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
20	0,67	67
40	1,36	69
60	2,15 *	79
80	3,15	100
100	4,53	138
110 Bruch.	7,95	342

Versuch 35. 75jähriger Mann.
R. Stützweite 16 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
20	0,85	85
40	1,71	86
60	2,60 *	89
80	3,75	115
100 Bruch.	6,94	319

Versuch 36. 78jähriger Mann.
L. Stützweite 16 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
20	0,42	42
40	0,87	45
60	1,31	44
80	1,87 *	56
100	2,59	72
120	3,38	79
140 Bruch.	5,59	221

Versuch 37. 20jähriges Weib.
R. Stützweite 14 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
10	0,65	65
20	1,30	65
30	2,02	72
40	3,12 *	110
50	4,50	138
55 Bruch.	10,3	580

Versuch 38. 24jähriges Weib.
Stützweite 14 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
10	0,52	52
20	1,07	55
30	1,60	53
40	2,14	54
50	2,98 *	84
60	4,0	102
70	5,26	126
80 Bruch.	11,77	651

Versuch 39. 32jähriges Weib.
R. Stützweite 14 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
20	0,90	90
40	1,63	73
60	2,52	89
80	3,73	121
90 Bruch.	16,35	1262

Versuch 40. 51jähriges Weib.
L. Stützweite 14 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
10	0,45	45
20	0,90	45
30	1,33	43
40	1,78	45
50	2,32	54
60	3,24	92
70	4,26	102
75 Bruch.	10,67	641

Versuch 41. 74jähriges Weib.
R. Stützweite 14 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
10	0,54	54
20	1,08	54
30	1,72 *	64
40	2,53	81
50	3,58	105
55 Bruch.	9,08	550

Versuch 42. 81jähriges Weib.
R. Stützweite 14 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
10	0,60	60
20	1,20	60
30	1,90 *	70
40	2,70	80
50	4,20	150
55 Bruch.	5,80	160

Ulna.

Angriffspunkt der Kraft auf die Crista ulnae (Druck von vornen nach hinten), Stützweite 12 cm:

Versuch 43. 38jähriger Mann. L.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
20	0,18	18
40	0,33	15
60	0,51	18
80	0,67	16
100	0,84	17
120	1,01	17
140	1,23	22
160	1,42	19
180	1,62	20
200	1,83	21
220 Bruch.	7,82	599

Angriffspunkt der Kraft auf die innere Fläche (Druck von innen nach aussen), Stützweite = 2/3 der Länge des Knochens:

Versuch 44. 18jähriger junger Mann.
R. Stützweite 14 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
10	0,45	45
20	0,90	45
30	1,35	45
40	1,96 *	61
50	2,66	70
60	3,39	73
70 Bruch.	14,55	1116

Versuch 45. 24jähriger Mann.
L. Stützweite 16 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
20	0,65	65
40	1,30	65
60	2,05 *	75
80	2,80	75
100 Bruch.	11,65	225

Versuch 46. 32jähriger Mann.
R. Stützweite 16 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
10	0,35	35
20	0,70	35
30	1,03	33
40	1,37	34
50	1,71	34
60	2,15 *	44
70	2,65	50
80	3,17	52
90	3,66	49
100	4,27	61
110 Bruch.	13,82	955

Versuch 47. 49jähriger Mann.
R. Stützweite 16 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
20	0,48	48
40	0,97	49
60	1,47	50
80	2,09 *	62
100	2,93	84
120	3,82	89
140 Bruch.	7,79	397

Versuch 48. 75jähriger Mann.
R. Stützweite 16 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
20	0,52	52
40	1,11	59
60	1,62	52
80	2,29 *	67
100	2,93	64
120	3,81	88
135 Bruch.	6,51	270

Versuch 49. 78jähriger Mann.
L. Stützweite 16 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
10	0,18	18
20	0,36	18
30	0,56	20
40	0,80	24
50	1,02	22
60	1,25	23
80	1,80 *	55
100	2,35	55
120	2,89	54
140 Bruch.	6,41	352

Versuch 50. 20jähriges Weib.
R. Stützweite 14 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
10	0,49	49
20	0,94	45
30	1,43	49
40	2,01 *	58
50	2,79	78
60	3,61	82
70 Bruch.	7,76	415

Versuch 51. 24jähriges Weib.
L. Stützweite 14 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
10	0,41	41
20	0,82	41
30	1,25	43
40	1,66	41
50	2,11 *	45
70	3,36	125
90 Bruch.	7,86	450

Versuch 52. 32jähriges Weib.
R. Stützweite 14 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
10	0,42	42
20	0,77	35
30	1,02	24
40	1,24	22
60	1,94	70
80	2,92	98
100 Bruch.	15,50	1258

Bei 8,0 mm Einbiegung Beginn von Knickung.

Versuch 53. 51jähriges Weib.
L. Stützweite 14 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
10	0,45	45
20	0,90	45
30	1,35	45
40	1,75	40
50	2,32	52
60	2,80	52
70	3,71	91
75 Bruch.	8,22	451

Versuch 54. 74jähriges Weib.
R. Stützweite 14 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
10	0,15	15
20	0,40	25
30	0,80	40
40	1,20	40
50	1,65	45
60	2,10	45
70	2,75	65
80 Bruch.	7,80	505

Versuch 55. 82jähriges Weib.
R. Stützweite 14 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
10	0,20	20
20	0,35	15
30	0,57	22
40	0,80	23
50	1,10 *	30
60	1,45	35
70	2,00	55
80	2,60	60
85 Bruch.	4,4	180

Femur.

Angriffspunkt der Kraft auf die vordere Fläche (Druck von vornen nach hinten), Spannweite = $^2/_3$ der Länge des Knochens:

Vers. 56. 18jähriges unentwickeltes männl. Individuum.
R. Stützweite 28 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
50	1,94	194
100	3,80	186
150	6,34 *	254
180 Bruch.	11,3 deutliche Knickung.	696
	13,3 Bruch.	

Versuch 57. 24jähriger Mann.
L. Stützweite 34 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
50	0,87	87
100	1,74	87
150	2,59	85
200	3,42	83
250	4,32 *	90
300	5,27	95
350	6,27	100
400	7,67	140
450	9,22	155
475 Bruch.	11,0 Beginn der Infraction.	1175
	20,97 Bruch vollständig.	

Versuch 58. 32jähriger Mann.
R. Stützweite 30 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
50	0,77	77
100	1,48	71
150	2,19	71
200	2,85	66
250	3,80 *	95
300	4,70	90
350	5,68	98
400	8,20	252
410 Bruch.	10,45	225

Versuch 59. 49jähriger Mann.
R. Stützweite 30 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
50	0,90	90
100	1,79	89
150	2,68	89
200	3,60 *	92
250	4,78	118
300	6,70	192
350 Bruch.	9,90	320

Versuch 60. 62jähriger Mann.
R. Stützweite 32 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
50	0,77	77
100	1,56	79
150	2,35	79
200	3,12	77
250	4,11 *	99
300	5,28	117
350	6,74	146
400 Bruch.	9,0	226

Versuch 61. 75jähriger Mann.
L. Stützweite 32 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
50	1,03	103
100	2,03	100
150	2,93	90
200	3,83	90
250	4,83 *	100
300	5,98	115
350	7,83	185
370 Bruch.	8,68	85

Versuch 62. 78jähriger Mann.
L. Stützweite 32 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
50	0,87	87
100	1,74	87
150	2,61	87
200	3,50	89
250	4,39	89
300	5,43	104
350	7,17	174
400 Bruch.	9,15	198

Versuch 63. 20jähriges Weib.
R. Stützweite 26 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
20	0,58	58
40	1,19	61
60	1,75	56
80	2,36	61
100	2,92	56
120	3,48	56
140	4,01	53
160	4,65	64
180	5,61	96
200	6,53	92
230 Bruch.	10,0	347

Versuch 64. 24jähriges Weib.
L. Stützweite 30 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
50	1,48	148
100	2,99	151
150	4,48	149
200	6,30	182
240 Bruch.	11,18	488

Versuch 65. 32jähriges Weib.
R. Stützweite 28 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
50	0,98	98
100	1,90	92
150	2,82	92
200	3,94	112
250	5,08	114
300	6,26	118
340 Bruch.	11,21	495

Versuch 66. 51jähriges Weib.
L. Stützweite 28 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
50	1,00	100
100	1,96	96
150	3,00	104
200	4,55	155
250	6,42	187
270 Bruch.	8,75	233

Versuch 67. 74jähriges Weib.
R. Stützweite 28 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
50	1,20	120
100	2,59	139
150	4,17	158
200	6,00	183
250 Bruch.	9,35	335

Versuch 68. 82jähriges Weib.
R. Stützweite 28 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
50	1,23	123
100	2,52	129
150	3,98	146
200	5,86	188
250 Bruch.	9,58	372

Angriffspunkt der Kraft auf die Linea aspera (Druck von hinten nach vornen), Stützweite = 2/3 der Länge des Knochens:

Versuch 69. 5½jähriger Knabe.
Stützweite 17 cm. (Directe Belastung mit Gewichten.)

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
10	0,37	37
20	0,74	37
30	1,20	46
40	1,66	46
50	2,15	49
60	2,57	42
70	3,00	43
80	3,55	55
90	4,15	60
100	4,95	80
110	5,95	100
120	7,5	155

Bruch an dem einen der Stützpunkte, nahe den Condylen.

Versuch 70. 32jähriger Mann.
L. Stützweite 30 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
50	0,76	76
100	1,48	72
150	2,18	70
200	2,89	71
250	3,65	76
300	4,63	98
350	5,90	127
400	8,18	228
410 Bruch.	10,28	210

Versuch 71. 62jähriger Mann.
L. Stützweite 32 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
50	0,73	73
100	1,46	73
150	2,18	72
200	2,94	76
250	3,82	88
300	4,94	112
350	6,28	134
400 Bruch.	8,04	176

Tibia.

Angriffspunkt der Kraft auf die Crista (Druck von vornen nach hinten), Stützweite 20 cm:

Versuch 72. 38jähriger Mann. L.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
50	0,22	22
100	0,44	22
150	0,74	30
200	1,00	26
250	1,40	30
300	1,71	31
350	2,05	34
400	2,43	38
450	2,86	43
500 Bruch.	3,66	80

Angriffspunkt der Kraft auf die Crista (Druck von vornen nach hinten), Stützweite = 2/3 der Länge des Knochens:

Versuch 73. 18jähriger Mann.
R. Stützweite 22 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
50	0,80	80
100	1,62	82
150	2,43	81
200	3,51	108
230 Bruch.	9,55	604

Versuch 74. 24jähriger Mann.
L. Stützweite 26 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
50	0,58	58
100	1,16	58
150	1,80	64
200	2,65	85
250	3,50	85
300	5,40	190
325 Bruch.	12,00	660

Versuch 75. 75jähriger Mann.
L. Stützweite 24 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
50	0,30	30
100	0,66	36
150	0,98	32
200	1,26	28
250	1,60	34
300	1,96	36
350	2,28	32
400	2,61	33
450	3,33	72
500 Bruch.	5,86	253

Versuch 76. 74jähriges Weib.
R. Stützweite 22 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
50	0,81	81
100	1,65	84
150	2,88	123
200	4,18	130
240 Bruch.	8,43	425

Versuch 77. 82jähriges Weib.
R. Stützweite 24 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
50	1,20	120
100	2,40	120
150	3,70	130
200	6,40	270
240 Bruch.	12,00	560

Angriffspunkt der Kraft auf die innere Fläche (Druck von innen nach aussen), Stützweite = $^2/_3$ der Länge des Knochens:

Versuch 78. 14jähriger Knabe.
L. Stützweite 20 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
10	0,62	62
20	1,27	65
30	1,90	63
40	2,50	60
50	3,12	62
60 Bruch.	27,81	2469

Bei 16 mm Einbiegung Beginn von Infraction.

Versuch 79. 32jähriger Mann.
R. Stützweite 24 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
50	1,04	104
100	2,12	108
150	3,18	106
200	4,97	179
235 Bruch.	8,43	346

Versuch 80. 49jähriger Mann.
R. Stützweite 24 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
50	1,11	111
100	2,26	115
150	3,29	103
200	4,49	120
250	6,47	198
280 Bruch.	8,88	241

Versuch 81. 78jähriger Mann.
L. Stützweite 26 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
50	0,86	86
100	1,73	87
150	2,62	89
200	3,49	87
250	4,67	118
310 Bruch.	7,33	266

Versuch 82. 20jähriges Weib.
R. Stützweite 22 cm

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
20	0,82	82
40	1,70	88
60	2,58	88
80	3,44	86
100	4,58	114
120	6,18	160
135 Bruch.	9,58	340

Versuch 83. 24jähriges Weib.
L. Stützweite 22 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
20	0,64	64
40	1,30	66
60	1,95	65
80	2,59	64
100	3,23	64
120	3,93	70
150	5,08	115
200 Bruch.	13,23	815

Versuch 84. 32jähriges Weib.
R. Stützweite 22 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
50	1,22	122
100	2,35	113
150	3,20	85
200	4,26	106
250	5,75	149
270 Bruch.	11,75	600

Versuch 85. 51jähriges Weib.
L. Stützweite 22 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
50	1,36	136
100	2,67	131
150	4,00	133
190	7,94 Beginn von Einknickung.	394
	10,24 Bruch vollständig.	

Angriffspunkt der Kraft auf die äussere Kante (Druck von hinten aussen nach vornen innen):

Versuch 86. 32jähriger Mann.
L. Stützweite 24 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
50	1,12	112
100	2,17	105
150	3,26	109
200	4,64	138
250	6,33	169
255 Bruch.	9,40	307

Fibula.

Angriffspunkt der Kraft auf die Crista fibulae (Druck von vornen nach hinten), Stützweite 20 cm:

Versuch 87. 38jähriger Mann. L.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
10	0,76	76
20	1,60	84
30	2,35	75
40	3,23	88
50	4,10	87
60	5,08	98
70 Bruch.	16,30	1122

Angriffspunkt der Kraft auf die Crista (Druck von vornen nach hinten), Stützweite = ⅔ der Länge des Knochens:

Versuch 88. 32jähriger Mann.
L. Stützweite 24 cm.
(Directe Gewichtsbelastung.)

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
4	0,65	65
8	1,27	62
12	1,90	63
16	2,73	83
20	3,59	86
24	4,46	87
28	5,40	94
32	6,40	100
36	8,00	160
40 Bruch.	15,20	720

Versuch 89. 49jähriger Mann.
R. Stützweite 24 cm.
(Directe Gewichtsbelastung.)

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
4	0,60	60
8	1,20	60
12	1,79	59
16	2,38	55
20	3,08	70
24	4,05	97
28	4,92	87
32	5,59	67
36	6,20	71
40	8,08	188
44 Bruch.	12,90	482

Versuch 90. 32jähriges Weib.
R. Stützweite 22 cm.
(Directe Gewichtsbelastung.)

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
4	0,56	56
8	1,12	56
12	1,68	56
16	2,26	58
20	2,81	55
24	3,41	60
28	4,11	70
32	4,96	85
36	5,81	85
40 Bruch.	13,31	750

Versuch 91. 51jähriges Weib.
L. Stützweite 22 cm.
(Directe Gewichtsbelastung.)

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
4	0,75	75
8	1,50	75
12	2,25	75
16	3,00	75
20	3,80	80
24	4,75	95
28	6,05	130
32 Bruch.	14,4	835

Versuch 92. 74jähriges Weib.
R. Stützweite 22 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
10	1,25	125
20	2,90	165
30	5,75	285
35 Bruch.	14,45	870

Versuch 93. 82jähriges Weib.
R. Stützweite 24 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in 1/100 mm
10	1,05	105
20	2,20	115
30	4,80	260
35 Bruch.	7,50	270

Angriffspunkt der Kraft auf die äussere Fläche (Druck von aussen nach innen), Stützweite = $^2/_3$ der Länge des Knochens:

Versuch 94. 14jähriger Knabe.
Stützweite 20 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm	
10	2,50	25	
20	5,60	31	
25	54,0	484	Bloss Infraction.

Versuch 95. 18jähriges kindliches Individuum.
Stützweite 22 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
10	2,10	210
20	4,40	230
30	13,60	920
35 Bruch.	15,20	160

Versuch 96. 24jähriger Mann.
L. Stützweite 26 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
10	3,7	37
20	7,0	33
30	10,3	33
40 Bruch.	37,9	276

Versuch 97. 32jähriger Mann.
R. Stützweite 24 cm. (Directe Gewichtsbelastung.)

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
4	1,2	12
8	2,4	12
12	3,6	12
16	4,7	11
20	5,9	12
24	7,4	15
28	9,3	19
32	12,5	32
36 Bruch.	19,5	70

Versuch 98. 75jähriger Mann.
L. Stützweite 24 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
10	0,97	97
20	1,94	97
30	2,90	96
40	4,12	122
50	9,30	518
55 Bruch.	12,30	300

Versuch 99. 78jähriger Mann.
L. Stützweite 26 cm.

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
10	1,30	130
20	2,61	131
30	4,59	198
40	7,44	285
50 Bruch.	14,10	766

Versuch 100. 20jähriges Weib.
R. Stützweite 22 cm. (Directe Gewichtsbelastung.)

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
4	1,28	128
8	2,55	127
12	3,85	130
16	5,10	125
20	6,55	145
24	8,25	170
28	10,75	250
30 Bruch.	17,75	700

Versuch 101. 24jähriges Weib.
L. Stützweite 22 cm. (Directe Gewichtsbelastung.)

Belastung. kg	Einbiegung. mm	Differenz in $^1/_{100}$ mm
4	1,40	140
8	2,78	138
12	4,19	140
16	5,89	170
20	8,29	240
21 Bruch.	25,0	1671

Aus den angeführten Zahlenreihen ist ersichtlich, wie die Einbiegungen anfänglich den Belastungen durchaus proportional gehen; darnach werden sie grösser und unmittelbar vor dem Bruche tritt noch eine verhältnissmässig sehr grosse Steigerung der Einbiegung auf. Die Elasticitätsgrenze, welche jedenfalls vor den Ausgangspunkt der Steigerung zu verlegen ist, fand sich in den Versuchen, wo sie überhaupt erkennbar war, nahe der Hälfte der Bruchbelastung.

Um die erhaltenen Zahlen vergleichen zu können, sind nachstehend in Tabelle I die Bruchbelastungen und in Tabelle II die elastischen Einbiegungen und die Totaleinbiegung bis zum Bruche von jenen Personen, deren Knochen in gleicher Weise und auf $^2/_3$ der Länge unterstützt geprüft wurden, zusammengestellt. Die elastischen Einbiegungen (Einbiegungen innerhalb der Elasticitätsgrenze) sind für alle Knochen auf je 10 kg Belastung ausgerechnet angegeben. Wo die Elasticitätsgrenze nicht deutlich markirt erschien, wurde die Einbiegung bei der halben Bruchbelastung der Rechnung zu Grunde gelegt. Fand endlich vor dem Bruche eine deutlich erkennbare Einknickung statt, so ist die betreffende besonders hohe Ausbiegung in Klammern.

I. Tabelle der Bruchbelastungen.

Stützweite $= {}^2/_3$ der Länge des Knochens. Die Belastungen in Kilo.

	Alter. Jahre.	Clavicula.	Humerus.	Radius.	Ulna.	Femur.	Tibia.		Fibula.	
		Angriffspunkt der Kraft auf die								
		vordere Kante.	vordere Kante.	innere Fläche.	innere Fläche.	vordere Fläche.	innere Fläche.	Crista tibiae.	äussere Fläche.	Crista fibulae.
Männer.	14	—	—	—	—	—	60	—	25	—
	18	50	110	65	70	180	—	230	35	—
	24	90	300	140	100	475	—	325	40	—
	32	115	300	120	110	410	235	—	—	40
	49	120	240	110	140	350	280	—	—	44
	62	—	—	—	—	400	—	—	—	—
	75	80	240	100	135	370	—	500	55	—
	78	95	300	140	140	400	310	—	50	—
Weiber.	20	60	150	55	70	230	100	—	30	—
	24	65	200	80	90	240	200	—	21	—
	32	70	240	90	100	340	270	—	—	40
	51	60	200	75	75	270	190	—	—	32
	74	65	120	55	80	250	—	240	—	35
	82	50	135	55	85	250	—	240	—	35

Wenn man die Bruchbelastungen der auf diese Weise geprüften erwachsenen Personen (also mit Ausschluss des 14jährigen und des wenig entwickelten 18jährigen Individuums) zusammenstellt, so ergibt sich als Mittel, Maximum und Minimum der Belastung folgendes:

	Männer.			Weiber.		
	Mittel. kg	Maximum. kg	Minimum. kg	Mittel. kg	Maximum. kg	Minimum. kg
Clavicula	100	120	80	62	70	50
Humerus	276	300	240	174	240	120
Radius	122	140	100	68	90	55
Ulna	125	140	100	83	100	70
Femur	400	475	350	263	340	230
Tibia, Druck auf die innere Fläche	275	310	235	190	270	100
Fibula	45	55	36	31	40	21

Bei Druck auf die Crista tibiae erfolgte bei zwei Männern der Bruch mit 500 und 325 kg, bei zwei Weibern mit je 240 kg.

Werden die Resultate bei Männern wie bei Weibern zusammen genommen, so sind die Mittelwerthe der Bruchbelastungen:

326 kg	326 kg	226 kg	220 kg	102 kg	93 kg	79 kg	38 kg
Femur.	Tibia. Druck auf die Crista.	Tibia. Druck auf die innere Fläche.	Humerus.	Ulna.	Radius.	Clavicula.	Fibula.

Das gegenseitige Verhältniss dieser Zahlen ist annähernd dasselbe, wie es zwischen

17 : 17 : 12 : 12 : 6 : 5 : 4 : 2

besteht.

II. Tabelle der elastischen Einbiegungen für 10 kg Belastung, sowie der Totaleinbiegungen bis zum Bruche in Millimetern.

(Stützweite = $^2/_3$ der Länge des Knochens.)

	Alter. Jahre.		Clavicula.	Humerus.	Radius.	Ulna.	Femur.	Tibia.		Fibula.	
			Angriffspunkt der Kraft auf die								
			vordere Kante.	vordere Kante.	innere Fläche.	innere Fläche.	vordere Fläche.	innere Fläche.	Crista tibiae.	äussere Fläche.	Crista fibulae.
Männer.	14	Elast. Biegung	—	—	—	—	—	0,62	—	2,5	—
		Totalbiegung	—	—	—	—	—	(27,81)	—	(64,0)	—
	18	Elast. Biegung	—	0,38	0,62	0,45	0,38	—	0,16	2,2	—
		Totalbiegung	10,9	12,0	14,9	14,55	(13,3)	—	9,55	15,2	—
	24	Elast. Biegung	—	0,18	0,33	0,32	0,17	—	0,12	3,5	—
		Totalbiegung	(16,0)	10,8	14,15	11,65	(20,97)	—	12.0	37,9	—
	32	Elast. Biegung	—	0,12	0,32	0,34	0,14	0,21	—	—	1,6
		Totalbiegung	10,0	8,6	9,28	13,82	10,45	8,43	—	—	15,2
	49	Elast. Biegung	—	0,17	0,34	0,24	0,17	0,21	—	—	1,5
		Totalbiegung	5,3	7,27	7,95	7,79	9,9	8,88	—	—	12,9
	62	Elast. Biegung	—	—	—	—	0,15	—	—	—	—
		Totalbiegung	—	—	—	—	9,0	—	—	—	—
	75	Elast. Biegung	—	0,16	0,43	0,27	0,19	—	0,06	0,97	—
		Totalbiegung	6,8	5,15	6.94	6,51	8,68	—	5,86	12,3	—
	78	Elast. Biegung	—	0,10	0,22	0,21	0,17	0,17	—	1,3	—
		Totalbiegung	7,9	4,5	5,59	6,41	9,15	7,33	—	14,1	—
Weiber.	20	Elast. Biegung	—	0,29	0,67	0,48	0,29	0,43	—	3,2	—
		Totalbiegung	6,2	7,49	10,3	7,76	10,0	9,58	—	17,75	—
	24	Elast. Biegung	—	0,26	0,53	0,41	0,29	0,32	—	3,4	—
		Totalbiegung	9,7	7,9	11,77	7,86	11,18	13,23	—	25,0	—
	32	Elast. Biegung	—	0,17	0,48	0,31	0,19	0,21	—	—	1,4
		Totalbiegung	9,5	10,89	16,35	(15,5)	11,21	11,75	—	—	13,3
	51	Elast. Biegung	—	0,15	0,44	0,44	0,20	0,26	—	—	1,9
		Totalbiegung	8,0	6,15	10,67	8,22	8,75	(10,24)	—	—	14,4
	74	Elast. Biegung	—	0,28	0,54	0,30	0,25	—	0,16	—	1,2
		Totalbiegung	(10,1)	6,7	9,08	7,80	9,35	—	8,43	—	14,4
	82	Elast. Biegung	—	0,26	0,60	0,20	0,25	—	0,24	—	1,1
		Totalbiegung	6,2	6,55	5,8	4,4	9,58	—	12,0	—	7,5

Diese Zusammenstellung der elastischen und der Totalbiegung (mit Ausschluss der in Klammern gesetzten Zahlen) gibt folgende Werthe für das Maximum und Minimum bei erwachsenen Personen:

	Elastische Ausbiegung für 10 kg Belastung.		Totalausbiegung bis zum Bruche.	
	Maximum. mm	Minimum. mm	Maximum. mm	Minimum. mm
Clavicula	—	—	10,0	5,3
Humerus	0,29	0,10	10,8	4,5
Radius	0,67	0,22	16,3	5,6
Ulna	0,48	0,20	13,8	4,4
Femur	0,29	0,14	11,2	8,6
Tibia (Druck auf die innere Fläche)	0,43	0,17	13,2	7,3
Fibula	3,5	0,97	37,9	7,5

Um Schlüsse über den Einfluss des Alters machen zu können und die an ganzen Knochen gefundenen Werthe mit den Resultaten Rauber's bei Prüfung der Knochensubstanz vergleichbar zu machen, wurde von Herrn Klebe für Oberarm, Tibia und Oberschenkel die Bestimmung des Festigkeitsmoduls und in ein paar Fällen auch die des Elasticitätsmoduls vorgenommen.

Den Berechnungen lagen die bekannten Formeln der Festigkeitslehre zu Grunde, wie sie in jedem ausführlichen Lehrbuche der technischen Mechanik entwickelt sind.

Hiernach ist für einen auf zwei Stützpunkten frei aufliegenden und durch eine in der Mitte concentrirte Kraft durchgebogenen Stab:

$$1)\ \text{die Biegungsfestigkeit} = \frac{1}{4} \cdot \frac{P_o\, l}{\Theta} \cdot e$$

$$2)\ \text{der Elasticitätsmodul} = \frac{1}{48} \cdot \frac{P_e\, e^3}{\Theta\, f}$$

In der ersten Formel ist P_o die Bruchbelastung, l die Stützweite, e die Entfernung der äussersten gezogenen oder gedrückten Faser von der neutralen Achse und Θ das Trägheitsmoment des Querschnittes bezüglich der neutralen, hier zugleich Schwerpunktsachse des Querschnittes.

In der zweiten Formel ist P_e die Belastung an der Elasticitätsgrenze, f die Durchbiegung an derselben, Θ und e geben dieselben Werthe an wie in der vorhergehenden Formel.

Querschnittsgrösse, Schwerpunkt und Trägheitsmoment wurden mittelst eines Amsler'schen Momenten-Planimeters an einem Abdrucke des Knochens bestimmt, welcher von der Mitte des Knochens, der Bruchstelle, nachdem dieselbe senkrecht zur Längsachse eben abgefeilt war, durch Bestreichen mit Druckschwärze und Ueberdrucken auf Papier hergestellt worden war.

Auf Taf. XVI finden sich diese Abdrücke sämmtlich zusammengestellt. Der Pfeil zeigt die Druckrichtung an, die Zahlen innerhalb der Knochenringe das Alter der betreffenden Personen.

Bei genauerer Betrachtung fällt die grosse Verschiedenheit der doch von stets der gleichen Stelle des Knochens genommenen Schnitte auf.

Da in den meisten Fällen sich die Querschnitte zur Bestimmung des Trägheitsmomentes mittelst des Planimeters als zu klein erwiesen, mussten von denselben, um eine Anwendung des Messinstrumentes zu ermöglichen, entsprechend vergrösserte Abbildungen hergestellt werden.

Hiezu wurde ein der geodätischen Sammlung des Polytechnikums entnommener genauer Pantograph verwendet, mit welchem sich äusserst sicher die Schnitte in vierfacher linearer Vergrösserung übertragen liessen.

Bei Berechnung des Elasticitätsmoduls blieben die Aenderungen in Grösse und Form des Knochenquerschnittes innerhalb der Stützpunkte unberücksichtigt.

Weiter unten sind die ermittelten Werthe von Θ und e zusammengestellt und ausserdem noch die Querschnittsgrössen; nachstehend die Resultate bezüglich Biegungsfestigkeit und Elasticitätsmodul.

Biegungsfestigkeit.

	Alter. Jahre.	Humerus. Vers.-Nro.	Humerus. kg pro qcm.	Femur. Vers.-Nro.	Femur. kg pro qcm.	Tibia. Vers.-Nro.	Tibia. kg pro qcm.	Mittelwerth. kg pro qcm.
Männer.	$5\frac{1}{2}$	—	—	69	1390 <	—	—	1390 <
	18	17	1380	56	1750	73	1540	1557
	24	18	1680	57	1940	74	1500	1810
	32 r.	19	1890	58	1940	79	1810	1893
	32 l.	29	1800	70	1940	86	1980	
	38	14	1290	—	—	72	1640	1465
	49	20	1590	59	1680	80	1730	1666
	62 r.	—	—	60	1500	—	—	1490
	62 l.			71	1480			
	75	21	1450	61	1580	75	1450	1493
	78	22	1160	62	1630	81	1590	1460
Weiber.	18 r.	15	1680	—	—	—	—	1650
	18 l.	16	1620					
	20	23	1430	63	1580	82	1830	1613
	24	24	1630	64	1730	83	1840	1733
	32	25	1670	65	1720	84	1910	1766
	51	26	1430	66	1600	85	1490	1507
	74	27	1040	67	1480	76	1320	1280
	82	28	1090	68	1330	77	1380	1266

Elasticitätsmodul.

32jähriger Mann. Rechter Humerus (Versuch 19) 180000 kg pro qcm.
Linker Humerus (Versuch 29) 152300 „ „ „
Rechter Femur (Versuch 58) 150000 „ „ „
Linker „ (Versuch 70) 153600 „ „ „

Darnach schwankt die Biegungsfestigkeit bei den Knochen verschiedener Personen zwischen 1040 bis 1980 kg pro qcm. Die verschiedenen Knochen einer einzelnen Person dagegen zeigen eine ziemliche Uebereinstimmung in den Zahlen und grössere Unterschiede kamen nur bei dem 78jährigen Manne vor.

Bei dem $5^1/_2$ Jahre alten Knaben, dessen Femur an dem einen Unterstützungspunkte brach, gibt die Zahl die Biegungsspannung in der Mitte beim Bruche und nicht die Biegungsfestigkeit an, welch' letztere sonach jedenfalls grösser ist als der angegebene Werth.

Es zeigt sich deutlich, dass die Zahlen bei Personen im mittleren Lebensalter grösser werden (nur der 38jährige Mann macht hierin eine Ausnahme), während sie im Alter und in der Jugend kleiner erscheinen.

Noch mehr tritt diess hervor, wenn man die Mittelwerthe aus den Festigkeiten der Knochen der verschiedenen Personen zusammenstellt, wie diess in der vierten Reihe obiger Tabelle geschehen ist. Es nimmt hiernach die Festigkeit bis zum mittleren Lebensalter zu und von da wieder ab.

Für die Festigkeit des Knochens scheint ein bestimmtes Verhältniss zwischen organischem und anorganischem Knochenmaterial entscheidend zu sein, und sowohl die grössere Menge organischer Substanz in der Jugend, als auch die geringere im Alter festigkeitsvermindernd zu wirken.

Wie überhaupt von der Verbindung dieser beiden Substanzen die Knochenfestigkeit abhängig ist, lässt sich aus einem Versuche Rauber's ersehen:

Von gleich grossen, aus demselben Knochen genommenen Würfeln, deren Kante je 5 mm betrug, wurde ein entkalkter durch eine Belastung von 68 kg zerdrückt, ein vorsichtig geglühter, der organischen Substanz entbehrender durch eine Belastung von 149 kg, während ein im unveränderten Zustande untersuchter Würfel eine Belastung bis zu 426 kg ertrug. Auf Rechnung der gegenseitigen Durchdringung beider Substanzen kam demnach etwa die Hälfte des Werthes der Widerstandskraft des Knochens gegen Druck.

Wenn man dagegen nicht das Knochenmaterial, sondern den ganzen Knochen als solchen in Betracht zieht, so erscheint als ein Hauptgrund der grösseren Knochenbrüchigkeit im Alter die Atrophie, welche auch bei einzelnen der Knochenschnitte auf Taf. XVI scharf hervortritt, z. B. bei den Abdrücken des 74- und 82jährigen Weibes. Die ungemein massiven Knochen des 76- und 78jährigen Mannes hinwieder lassen nicht die geringste Altersveränderung erkennen.

Bei Vergleichung der Werthe mit den Rauber'schen findet man eine ziemlich gute Uebereinstimmung beider.

Nach Rauber bedurften 8 cm lange Knochenstäbchen von 2 mm Höhe und 2 mm Breite aus dem Oberschenkel und dem Schienbeine eines 46jährigen Mannes bei gewöhnlicher Temperatur einer Belastung von 1318—1688 g und bei einer Temperatur von 38° C. einer Belastung von 1170—1300 g zum Bruche. Die hieraus berechnete Biegungsfestigkeit ist für die bei gewöhnlicher Temperatur geprüften Stäbchen 1977—2532 und für die erwärmten 1755—1950 kg pro qcm. Bei den Knochen unseres 32jährigen Mannes schwankte die Festigkeit zwischen 1800—1980 kg pro qcm.

Der Elasticitätsmodul weicht nur unbedeutend von dem Rauber'schen ab, indem er etwas kleiner gefunden wurde.

Da bei meinen Versuchen die Knochen immer auf $^2/_3$ ihrer Länge seitlich unterstützt und in der Mitte belastet wurden, die Belastung ferner bei den gleichen Knochen meist auf dieselbe Kante oder Fläche ihren Angriffspunkt hatte, so bleibt uns noch zu eruiren übrig, in wie weit eine andere Stützweite und Lage des Knochens von Einfluss auf den Ausfall des Resultates gewesen wäre.

Nach den Regeln der Statik steht bei gleichen Querschnittsdimensionen die Tragfähigkeit bei Biegung im umgekehrten Verhältniss zur Länge; ein Knochen wird also im Allgemeinen um so weniger tragen, je länger er ist. Da aber bei den Knochen der Querschnitt nach den Enden zu eine Vergrösserung erfährt, so nimmt bei ihnen die Festigkeit nicht in demselben, sondern in einem etwas geringeren Grade ab, als die Stützweite grösser genommen wird.

Von den verschiedenen Biegungsbeanspruchungen, die vorkommen können, sollen nur zwei Fälle in

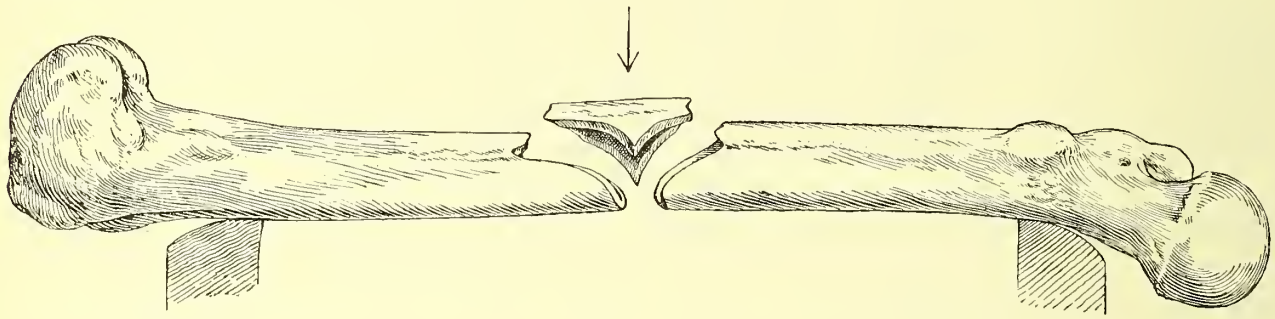
Betracht gezogen werden, nämlich der eine, dass der Körper, wie es bei den Versuchen geschah, auf zwei Stützpunkten frei aufliegt und in der Mitte belastet wird, und der andere, wobei der Körper an einem Ende festgehalten ist, und die Kraft an dem freien Ende wirkt. In letzterem Falle ist bei sonst gleichen Verhältnissen die Tragfähigkeit nur $^1/_4$ von derjenigen der ersteren Anordnung, und es lassen sich die in dem ersten Falle gefundenen Werthe auf den zweiten durch einfache Rechnung übertragen.

Der Bruch erfolgt bei beiderseitiger Unterstützung der Enden in der Mitte, bei einseitiger Befestigung an der Befestigungsstelle als denjenigen Stellen, in welchen die grössten Biegungsspannungen auftreten.

Von grossem Einflusse auf die Festigkeit ist ferner die Richtung, in welcher die Kraft auf den Knochen wirkt.

Denn da die Tragfähigkeit direct mit der Breite und mit dem Quadrat der Höhe eines auf Biegung beanspruchten Körpers wächst, und die Knochen nur selten einen kreisförmigen, sondern meist einen dreieckigen oder elliptischen Querschnitt haben, werden nicht unbedeutend von einander differirende Werthe erhalten, je nachdem die schmale oder breite Seite Angriffspunkt der Kraft ist.

Ein Beispiel hiefür bietet die Tibia, welche bei Druck auf die Crista im Mittel 326 kg, bei Druck auf die innere Fläche im Mittel 226 kg trug.



Wie bei den Zerknickungsversuchen schon erwähnt, ist an und für sich die Form der Extremitätenknochen in mehrfacher Beziehung günstig für die Tragfähigkeit auch bei Biegung.

Namentlich durch das Vorhandensein des Markraumes ist eine vollständige Ausnützung des Materials für die Festigkeit erreicht. Denken wir uns nämlich einen massiven Cylinder, der gebogen wird, so erleiden die Theile auf der convexen Seite einen Zug, die auf der concaven einen Druck. Diese Zug- und Druckspannungen werden gegen die Achse des Cylinders zu kleiner und in der Mitte schliesslich O, indem hier, in der sogenannten neutralen Achse weder eine Ausdehnung noch eine Zusammendrückung der Fasern stattfindet. Daraus geht hervor, dass das entfernt von der neutralen Achse befindliche Material für die Festigkeit mehr leistet als jenes, welches nahe derselben angebracht ist, und dass bei gleicher Flächengrösse des Querschnittes ein Hohlcylinder mehr trägt als ein Vollcylinder.

Der Bruch war ebenso wie bei den Strebfestigkeits-Schaftbrüchen bald schräg, bald quer verlaufend, meist gezackt, in ein paar Fällen aber scharf und fast wie mit dem Messer geschnitten (Taf. XIII, Fig. 1 und 2). Mehrere Male fand sich eine ausgedehnte Längsfissur an dem einen oder dem andern der beiden Fragmentstücke und zwar auf jener Seite des Knochens, welche bei der Biegung die concave gewesen war (Taf. XIII, Fig. 7, 8).

Eine eigenthümliche Art des Bruches, auf deren Vorkommen bei den Knochen noch nicht aufmerksam gemacht worden ist, will ich hier ganz besonders erwähnen.

In mehreren Fällen erfolgte nämlich an der Stelle, an welcher die Kraft einwirkte, die Aussprengung eines keilförmigen Stückes, dessen Basis der Druckrichtung zugekehrt war, somit der Concavität bei der Ausbiegung entsprach (siehe obenstehende Abbildung).

Das Vorkommen einer solchen Bruchform bei der Biegung von Körpern ist nichts Neues und wurde namentlich bei Stahl schon vielfach beobachtet. Sie kommt vor bei einem gleichmässigen körnigen Material, niemals wurde sie bisher beobachtet bei Gusseisen, Stein, Holz. Theoretisch ist die Erscheinung noch nicht genügend erklärt, und über die mechanischen Ursachen ihres Zustandekommens lässt sich nur wenig sagen:

Der Druck, welchen bei einer Biegung die Theile der concaven Seite erleiden, ist an Stelle der grössten Einbiegung (also im Angriffspunkte der Kraft bei beiderseitiger Unterstützung und Belastung der Mitte) am grössten, und es findet daselbst eine Veränderung in der Weise statt, dass gerade durch den Druck die Dichtigkeit der betreffenden Partie erhöht wird. In Folge dieser Dichtigkeitsvermehrung geht nun, wenn der Bruch durch Einreissen der auf Zug beanspruchten Fasern der Convexität erfolgt, der Riss nicht quer durch den länglichen Körper hindurch, sondern er biegt seitlich um diese Partie herum, und es entsteht die charakteristische Keilform.

Wenn auch ein solcher ausgesprochener Bruch mit Aussprengung eines Keiles nur einigemal statthatte (Taf. XIV, Fig. 1—4), so finden sich doch fast ausnahmslos bei den Biegungs- Quer- und Schrägbrüchen Andeutungen desselben in der Form von Fissuren, welche eine Keilform umgrenzen (siehe die Abbildungen auf Taf. XIV).

Ich bin daher geneigt, diese Bruchform geradezu als die normale bei den Biegungsbrüchen der Knochen anzunehmen und führe namentlich die bei Biegung entstehenden Schrägbrüche darauf zurück, dass sehr oft nur auf einer Seite des Keiles die vollständige Knochentrennung erfolgt, während es auf der anderen Seite bei einer Fissur bleibt.

Auch bei den auf Säulenfestigkeit geprüften Röhrenknochen fanden sich in einigen Fällen (beim Radius, der Ulna, Femur, Fibula) Annäherungen an einen solchen Keilbruch (Taf. XI, Fig. 9, 14, 15 und Taf. XII, Fig. 4, 5, 9 und 10).

Wenn auch in praktischer Hinsicht die erwähnte Bruchform wenig Interesse bietet, so hat sie für das Verständniss der Knochentextur doch einigen Werth. Sie zeigt, dass der Knochen trotz seines sicher bestehenden faserigen Baues ein ganz gleichmässiges Gefüge hat, und seine Masse eine vollständig homogene ist.

Da ich in einigen Fällen auch durch plötzliche Einwirkung auf die Mitte langer Knochen eine gleiche Bruchform herbeiführen konnte, so ist nicht daran zu zweifeln, dass ebenso bei den in der Wirklichkeit vorkommenden Knochenbrüchen, falls die Gewalt innerhalb gewisser Grenzen blieb, eine ähnliche Keilform sich angedeutet finden kann, und es lässt sich theilweise durch diese Erscheinung das häufige Vorkommen von Schrägbrüchen in praxi erklären.

Ergänzungswerthe zur Berechnung der Biegungsfestigkeit und des Elasticitätsmoduls für Biegung.

Vers.-Nro.	e cm	Θ bqcm	Querschnittsgrösse. qcm	Vers.-Nro.	e cm	Θ bqcm	Querschnittsgrösse. qcm	Vers.-Nro.	e cm	Θ bqcm	Querschnittsgrösse. qcm
—	—	—	—	69	0,946	0,347	1,26	—	—	—	—
17	0,89	0,354	1,21	56	1,195	0,859	2,19	73	1,56	1,28	2,00
18	1,10	1,180	2,54	57	1,54	3,20	4,70	74	1,33	2,31	3,42
19	1,16	1,010	2,53	58	1,66	2,63	4,16	79	1,21	0,942	2,87
29	1,12	0,922	2,47	70	1,30	2,532	4,10	86	1,28	0,986	2,78
14	1,18	1,495	2,54	—	—	—	—	72	1,30	2,184	3,17
20	1,08	0,920	2,02	59	1,41	2,206	4,00	80	1,25	1,08	3,20
—	—	—	—	60	1,70	3,57	5,24	—	—	—	—
—	—	—	—	71	1,44	3,112	5,01	—	—	—	—
21	1,15	1,05	2,41	61	1,45	2,63	4,47	75	1,41	2,91	3,54
22	1,34	1,91	3,05	62	1,70	3,32	4,35	81	1,36	1,72	3,80
15	0,80	0,356	1,28	—	—	—	—	—	—	—	—
16	0,88	0,376	1,30	—	—	—	—	—	—	—	—
23	0,90	0,471	1,44	63	1,00	1,068	2,67	82	0,90	0,365	1,94
24	0,89	0,546	1,63	64	1,27	1,260	3,18	83	0,91	0,544	2,09
25	1,11	0,795	1,83	65	1,43	1,983	3,33	84	1,15	0,892	2,37
26	0,97	0,614	1,60	66	1,20	1,806	3,12	85	1,02	0,717	2,02
27	1,01	0,582	1,46	67	1,36	1,61	3,24	76	1,12	1,116	1,70
28	1,02	0,635	1,70	68	1,30	1,705	3,17	77	1,14	1,19	2,24

4) Torsionselasticität und Festigkeit.

Versuche über die zum Abdrehen ganzer Knochen erforderlichen Belastungen und die dabei stattfindenden Verwindungsgrössen sind meines Wissens noch nicht angestellt worden.

Bei den eigenen in dieser Hinsicht gemachten Prüfungen war das eine Ende des zu untersuchenden Knochens mittelst einer Klammer festgehalten, und an dem anderen kam die verwindende Kraft zur Wirkung.

Der hiezu benützte, wie schon erwähnt, eigens zusammengestellte Torsionsapparat ist auf Taf. IV Fig. 1 abgebildet und trägt rechterseits die in einer Nute zu verschiebende und an beliebiger Stelle anschraubbare Klemmvorrichtung zur Festhaltung des bei der Torsion fix bleibenden Knochenendes. Die Anordnung dieser Vorrichtung ist nach der Figur leicht verständlich.

Das zu torquirende Knochenende dagegen ist linkerseits in einem Einspannkopfe, einem gusseisernen, mit 4 Klemmschrauben versehenen Cylinder durch Anpressen zweier Holzlagerstücke, die genau nach der Form des einzuspannenden Knochenendes gearbeitet sind, befestigt.

Fig. 2 zeigt den Einspannkopf mit den Holzlagern und Fig. 3 die Lager allein für das untere Ende eines Oberschenkels.

Der Einspannkopf steht in Verbindung mit der Torsionswelle, welche auf einem Doppellager leicht beweglich ruht und an ihrem äusseren Ende ein Rad von 32 cm Durchmesser trägt. Ein an diesem befestigter und um dasselbe geschlungener starker Strang läuft nach abwärts über eine am Fusse des Gestelles befindliche Rolle und von da nach aufwärts, wo er mit einem genauen Federdynamometer und dieses wieder mit einem Differenzialflaschenzug in Verbindung steht. Der Flaschenzug endlich ist an der Decke festgemacht.

Nach dem vorher Gesagten ist es klar, dass beim Anziehen des Flaschenzuges eine Anspannung des Zugstranges und eine Drehung des Rades sowie der Torsionswelle hervorgebracht wird, an welcher Drehung das in den Kopf eingespannte Knochenende theilnimmt. Der eingeschaltete Dynamometer zeigt die zur Torsion des Knochens aufgewendete Kraft von $^1/_2$ zu $^1/_2$ kg an.

Die Grösse der Verdrehung wurde mittelst eines auf den Knochen aufgesteckten Zeigers an dem nahe dem Einspannkopfe befindlichen Gradbogen in Graden und Zehntelsgraden angegeben. Ein ebensolcher Zeiger und Gradbogen nahe dem fixen Ende des Knochens diente dazu, etwaige hier stattfindende Veränderungen zu controliren. Die Ablesungen an letzterem Gradbogen von jenen am torquirten Ende befindlichen Bogen abgezogen, gab die Verwindung für das innerhalb der beiden Zeiger befindliche Knochenstück.

Fig. 4 zeigt einen solchen Zeiger in natürlicher Grösse auf dem Querschnitte eines Oberarmes.

Da die beiden Gradbogen in der Nute des Gestelles verschiebbar waren, konnten für die Messung der Verwindung verschiedene und beliebig lange Strecken genommen werden.

Die Befestigung des Knochens im Apparate hatte immer ziemliche Schwierigkeiten; denn einestheils durfte durch zu starkes Einklemmen der betreffende Knochen nicht verletzt oder gar zersplittert werden, anderntheils blieb bei zu schwachem Einklemmen während der Torsion der Knochen mit seinem Lager stehen, und der Einspannkopf drehte sich um ihn herum. Zwischenlager von grobem Smirgelpapier an den Knochenenden verhinderten dieses Zurückbleiben ziemlich gut. Mit ganz besonderer Sorgfalt war jedesmal darauf gesehen worden, dass die Knochenaxe genau in die Axe der Torsionswelle zu liegen kam.

Die Reibung im Apparate konnte, wenn kein Prüfungsobject eingespannt war, bei Anziehen des Flaschenzuges an dem Federdynamometer direct abgelesen werden. Sie betrug circa $^1/_4$ kg.

In den nachstehend aufgeführten Versuchen sind die Belastungen direct, wie sie die Prüfung ergab, angegeben; dieselben beziehen sich also auf einen Torsionshebel von 16 cm, gleich dem Radius des Torsionsrades. Die Verwindung wurde immer für ein der halben Länge des betreffenden Knochens entsprechendes Mittelstück des Schaftes ermittelt.

Der Bruch erfolgte meist plötzlich und unter Krachen in der Regel an der Stelle des schwächsten Querschnittes.

Clavicula.

Versuchs-Nro.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Alter: Jahre	28	29		19	25	51	53
Geschlecht:	Mann	Mann		Weib	Weib	Weib	Weib
Körperseite:	r.	r.	l.	r.	r.	r.	l.
Bruchbelastung: kg	7,5	11	10	5	7	6	6,5

Die Bruchstelle lag meist nahe der Mitte der Clavicula.

Humerus.

Versuch 8. 27jähriger Mann. Rechts. Messstrecke für die Verwindung 18 cm.

Belastung kg	Verwindung Grade	Differenz in 1/10 Graden
10	1,4	14
20	2,8	14
30	4,6	18
40	6,5	19
48 Bruch.	8,3	18

Der Bruch am oberen Ende ist beeinflusst durch starke Quetschung daselbst in Folge der Einspannung; die Bruchbelastung daher nicht brauchbar.

Versuch 9. 28jähriger Mann.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 17 cm.

Belastung kg	Verwindung Grade	Differenz in 1/10 Graden
5	1,4	14
10	2,2	8
15	3,9	17
20	5,2	13
25	6,5	13
30	7,9	14
35	8,6	7
40	11,1	25
45	11,9	8
50 Bruch.	13,7	18

Versuch 10. 28jähriger Mann.
Links. Messstrecke für die Verwindung 16,5 cm.

Belastung kg	Verwindung Grade	Differenz in 1/10 Graden
5	1,4	14
10	2,8	14
15	4,2	14
20	6,1	19
25	7,5	14
30	8,6	11
35	11,5	29
40 Bruch.	14,8	33

Versuch 11. 29jähriger Mann.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 16 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
5	1,0	10
10	1,8	8
15	2,6	8
20	3,6	10
25	4,3	7
30	5,0	7
35	5,7	7
40	6,4	7
45	7,9	15
50 Bruch.	12,9	50

Versuch 12. 29jähriger Mann.
Links. Messstrecke für die Verwindung 16 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
5	1,0	10
10	1,8	8
15	2,8	10
20	3,9	11
25	5,0	11
30	6,1	11
35	7,2	11
40	8,3	11
45	10,4	21
50 Bruch.	12,9	25

Versuch 13. 56 jähriger Mann.
Links. Messstrecke für die Verwindung 17 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
5	1,1	11
10	2,2	11
15	3,5	13
20	4,6	11
25	5,7	11
30	6,8	11
35 Bruch.	8,3	15

Versuch 14. 19 jähriges Weib.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 16 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
5	1,4	14
10	3,2	18
15	4,6	14
20	5,7	11
25	7,2	15
30	8,6	14
35 Bruch.	17,2	86

Versuch 15. 25 jähriges Weib.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 17 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
5	1,1	11
10	2,5	14
15	3,6	11
20	4,7	11
25	6,1	14
30	7,2	11
35	8,3	11
38 Bruch.	12,2	39

Versuch 16. 39 jähriges Weib. L.
Bruch des Knochens bei 51 kg Belastung.

Versuch 17. 51 jähriges Weib.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 13,5 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
5	1,1	11
10	2,2	11
15	5,0	28
20	6,4	14
25	8,2	18
30 Bruch.	13,0	31

Versuch 18. 53 jähriges Weib.
Links. Messstrecke für die Verwindung 16 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
5	1,8	18
10	3,2	14
15	4,6	14
20	6,4	18
25	8,6	22
30 Bruch.	10,4	18

Versuch 19. 81 jähriges Weib.
Links. Messstrecke für die Verwindung 15,5 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
5	1,8	18
10	3,2	14
15	5,0	18
20	6,8	18
25 Bruch.	7,6	8

Die Bruchstelle lag in der Mitte des Humerus in Versuch 9 und 12, im unteren Drittel in Versuch 10, 11, 14, 15, 16, im oberen Viertel nahe dem chirurgischen Halse in Versuch 13, 17, 18, 19.

Radius.

Versuch 20. 28jähriger Mann.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 12 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in $^1/_{10}$ Graden
2,5	1,8	18
5	4,0	22
7,5	7,2	32
10	10,4	32
12,5	17,2	68
14 Bruch.	21,6	44

Versuch 21. 29jähriger Mann.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 12 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in $^1/_{10}$ Graden
2,5	2,1	21
5	4,3	22
7,5	6,8	25
10	9,0	22
12,5	10,8	18
15	12,2	14
17,5 Bruch.	17,2	50

Versuch 22. 29jähriger Mann.
Links. Messstrecke für die Verwindung 12 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in $^1/_{10}$ Graden
2,5	2,1	21
5	4,3	22
7,5	6,4	21
10	8,6	22
12,5	10,8	22
15 Bruch.	14,4	36

Versuch 23. 56jähriger Mann.
Links. Messstrecke für die Verwindung 12 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in $^1/_{10}$ Graden
2,5	3,5	35
5	6,8	33
7,5	10,1	33
10 Bruch.	13,3	33

Versuch 24. 19jähriges Weib.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 11 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in $^1/_{10}$ Graden
2,5	4,0	40
5	6,0	20
7,5	13,3	73
10 Bruch.	23,4	101

Versuch 25. 25jähriges Weib.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 12 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in $^1/_{10}$ Graden
2,5	2,5	25
5	5,0	25
7,5	7,5	25
10	10,0	25
12,5	12,6	26
15 Bruch.	17,2	46

Versuch 26. 51jähriges Weib.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 10 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in $^1/_{10}$ Graden
2,5	1,8	18
5	3,6	18
7,5	8,2	46
10 Bruch.	9,0	8

Versuch 27. 53jähriges Weib.
Links. Messstrecke für die Verwindung 12 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in $^1/_{10}$ Graden
2,5	2,8	28
5 Bruch	7,2	44

Versuch 28. 81 jähriges Weib.
Links. Messstrecke für die Verwindung 11 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in $^1/_{10}$ Graden
2,5	2,8	28
5	4,6	18
7,5	8,2	36
8,5 Bruch	10,8	26

Der Bruch befand sich im oberen Drittel des Knochens bei Versuch 20, 21, 22, 26, 27, 28, in der Mitte bei Versuch 23 und 24, und im unteren Drittel bei Versuch 25.

Ulna.

Versuchs-Nro.:		29	30	31	32	33
Alter:	Jahre	28	29	19	51	81
Geschlecht:		Mann	Mann	Weib	Weib	Weib
Körperseite:		R	R	R	R	L
Bruchbelastung:	kg	7	13,5	8,5	6	6

Versuch 34. 29 jähriger Mann.
Links. Messstrecke für die Verwindung 12 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in $^1/_{10}$ Graden
2,5	2,1	21
5	3,2	11
7,5	5,4	22
10 Bruch.	7,9	25

Versuch 35. 56 jähriger Mann.
Links. Messstrecke für die Verwindung 12 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in $^1/_{10}$ Graden
2,5	2,5	25
5 Bruch.	6,8	43

Versuch 36. 53 jähriges Weib.
Links. Messstrecke für die Verwindung 12 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in $^1/_{10}$ Graden
2,5	3,6	36
4	5,0	14

Bei dieser Belastung Bruch, der jedoch durch zu starkes Einklemmen beeinflusst war. Die Bruchbelastung daher nicht brauchbar.

Mit Ausnahme der rechten Ulna des 29 jährigen Mannes, bei welcher ein Bruch der Mitte stattfand, erfolgte sonst stets der Bruch im schwächsten Querschnitte, im unteren Fünftel des Knochens.

Femur.

Versuch 37. 27jähriger Mann.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 25 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
20	1,1	11
40	2,2	11
60	3,6	14
80	5,0	14
100	6,1	11
120	7,9	18
142 Bruch.	9,0	11

Versuch 38. 28jähriger Mann.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 25 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
10	0,9	9
20	2,0	11
30	3,4	14
40	4,5	11
50	5,9	14
60	7,3	14
70	8,6	13
74 Bruch.	12,6	40

Versuch 39. 29jähriger Mann.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 23 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
10	1,0	10
20	1,8	8
30	2,3	5
40	2,8	5
50	3,6	8
60	4,7	11
70	5,8	11
80	6,9	11
90	8,2	13
100	9,4	12
110	11,1	17
120	12,6	15
122 Bruch.	13,3	7

Versuch 40. 29jähriger Mann.
Links. Messstrecke für die Verwindung 23 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
10	1,0	10
20	2,1	11
30	2,9	8
40	3,6	7
50	4,3	7
60	5,0	7
70	5,7	7
80	6,4	7
90	7,2	8
100	8,2	10
110	9,0	8
120	9,7	7
130 Bruch.	13,6	39

Versuch 41. 56jähriger Mann.
Links. Messstrecke für die Verwindung 22 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
10	0,3	3
20	0,7	4
30	1,4	7
40	2,1	7
50	2,8	7
60	3,6	8
70	4,3	7
80	4,9	6
90 Bruch.	5,6	7

Versuch 42. 19jähriges Weib.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 21 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
10	1,5	15
20	3,2	17
30	4,3	11
40	5,8	15
50	7,9	21
60	9,4	15
70	11,9	25
80 Bruch.	16,2	43

Versuch 43. 25 jähriges Weib.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 23 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
20	1,6	16
40	3,1	15
60	4,7	16
80	6,3	16
100	8,6	23
120	12,6	40
132 Bruch.	13,6	10

Versuch 44. 39 jähriges Weib.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 25 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
20	1,4	14
40	2,5	11
60	3,6	11
80	4,7	11
100	6,8	21
121 Bruch.	9,0	22

Versuch 45. 51 jähriges Weib.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 21 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
10	1,0	10
20	2,1	11
30	3,2	11
40	4,3	11
50	5,4	11
60	6,4	10
70 Bruch.	7,9	15

Bruch im oberen Drittel.

Versuch 46. 53 jähriges Weib.
Links. Messstrecke für die Verwindung 22 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
10	0,7	7
20	1,1	4
30	1,8	7
40	2,2	4
50	2,9	7
60	3,6	7
70	4,7	11
78 Bruch.	5,0	3

Versuch 47. 69 jähriges Weib.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 21,5 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
10	0,7	7
20	1,8	11
30	2,5	7
40	3,2	7
50	5,0	18
60	6,5	15
70	7,9	14
78 Bruch.	9,0	11

Versuch 48. 69 jähriges Weib.
Links. Messstrecke für die Verwindung 21,5 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
10	1,1	11
20	2,9	18
30	4,7	18
40	7,2	25
51 Bruch.	10,0	28

Versuch 49. 81 jähriges Weib.
Links. Messstrecke für die Verwindung 22,5 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
10	0,9	9
20	1,8	9
30	3,2	14
40	4,3	11

Bei 50 kg Belastung erfolgt ein Bruch am Schenkelhalse, beeinflusst durch zu starken Druck in der Einspannung.

Die Bruchstelle lag im oberen Drittel des Knochens bei Versuch 37, 38, 40, 41, 44, 45, in der Mitte bei Versuch 39, im unteren Drittel bei Versuch 42, 43, 46, 47, 48.

Tibia.

Versuch 50. 27 jähriger Mann.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 21 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
10	1,1	11
20	2,2	11
30	3,2	10
40	4,3	11
50	6,4	21
60	7,5	11
70 Bruch.	8,3	8

Versuch 51. 28 jähriger Mann.
Links. Messstrecke für die Verwindung 20 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
10	2,1	21
20	4,2	21
30	5,7	15
40 Bruch.	7,2	16

Versuch 52. 29 jähriger Mann.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 18 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
10	1,0	10
20	2,1	11
30	3,2	11
40	4,2	10
50	5,0	8
60 Bruch.	5,4	4

Versuch 53. 29 jähriger Mann.
Links. Messstrecke für die Verwindung 18 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
10	1,0	10
20	2,5	15
30	3,7	12
40	4,7	10
50	5,5	8
60	7,5	20
65 Bruch.	8,2	7

Versuch 54. 56 jähriger Mann.
Links. Messstrecke für die Verwindung 18 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
10	1,8	18
20	3,7	19
30	5,4	17
40	7,2	18
50 Bruch.	10,1	29

Versuch 55. 19 jähriges Weib.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 18 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
5	1,2	12
10	2,6	14
15	3,9	13
20	5,3	14
25	7,2	19
30	8,6	14
35	9,7	11
40 Bruch.	13,0	33

Versuch 56. 25 jähriges Weib.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 17 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
10	1,1	11
20	2,1	10
30	3,6	15

Innerhalb der Einspannung bricht die untere Epiphyse ab, beeinflusst durch zu starken Druck.

Versuch 57. 51 jähriges Weib.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 17 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
10	2,1	21
20	4,3	22
30	6,1	18
36 Bruch.	7,2	11

Versuch 58. 53 jähriges Weib.
Links. Messstrecke für die Verwindung 18 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
10	1,4	14
20	2,6	12
30	3,6	10
37 Bruch.	5,9	23

Versuch 59. 81 jähriges Weib.
Links. Messstrecke für die Verwindung 18,5 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
10	1,8	18
20	3,6	18
30 Bruch.	10,8	72

Der Bruch fand sich mit Ausnahme von Versuch 55, wo er in der Mitte des Knochens lag, sonst regelmässig im unteren Viertel, an Stelle des kleinsten Querschnittes.

Fibula.

Versuch 60. 28 jähriger Mann.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 19 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
2,5	6,1	61
4 Bruch.	7,2	11

Versuch 61. 29 jähriger Mann.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 18 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
2,5	7,2	72
5	14,4	72
7,5 Bruch.	16,6	22

Versuch 62. 29 jähriger Mann.
Links. Messstrecke für die Verwindung 18 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
2,5	9,0	90
5	14,4	54
6 Bruch.	15,8	14

Versuch 63. 56 jähriger Mann.
Links. Messstrecke für die Verwindung 18 cm.

Bei 2,5 kg Belastung war die Verwindung 9,7 °.
Der Bruch erfolgte bei 5 kg, ohne dass die Verwindung nochmals abgelesen werden konnte.

Versuch 64. 19 jähriges Weib.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 18 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
2,5	12,6	126
5 Bruch.	23,9	113

Versuch 65. 25 jähriges Weib.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 17,5 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
2,5	6,4	64
5	10,4	40
7,5	15,1	47
10 Bruch.	20,9	58

Versuch 66. 51 jähriges Weib.
Rechts. Messstrecke für die Verwindung 17 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
2,5	5,4	54
5 Bruch.	9,0	36

Versuch 67. 53 jähriges Weib.
Links. Messstrecke für die Verwindung 18 cm.

Belastung. kg	Verwindung. Grade	Differenz in 1/10 Graden
2,5	9,0	90
5 Bruch.	22,3	133

Nur bei Versuch 65 erfolgte der Bruch in der Mitte des Knochens, sonst regelmässig im oberen Viertel desselben.

Die Verwindung, welche bei den Knochen bis zum Bruche statthatte, war demnach eine sehr geringe; am grössten war sie bei der Fibula des 19 jährigen Mädchens, wo sie 23,9° betrug; aus den Zahlen ist ferner ersichtlich, dass die Torsionszunahme in den meisten Fällen bis zum Bruche nahezu proportional blieb, und dass sich in keinem Falle eine Elasticitätsgrenze zeigte.

Um die Zahlen vergleichbar zu machen, sollte die elastische Verwindung bei allen Knochen für die gleiche Belastung ausgerechnet werden, und es wurde dazu das Gewicht von 1 kg gewählt. Dabei konnte es wegen der Proportionalität der Verwindungszunahme bis zum Bruche ziemlich gleichgültig sein, an welcher Stelle die Elasticitätsgrenze lag. Nachdem sie aber bei den Biegungsversuchen sich meist nahe der Hälfte der Bruchbelastung fand, so wurde auch hier die halbe Bruchbelastung der Rechnung zu Grunde gelegt.

Nachstehend die Zusammenstellung der Bruchbelastungen, der Totalverwindungen und der ausgerechneten elastischen Verwindungen pro 1 kg.

Bruchbelastungen in Kilo bei einem Torsionshebel von 16 cm Länge.

	Alter.	Clavicula.	Humerus.	Radius.	Ulna.	Femur.	Tibia.	Fibula.
Männer.	27	—	—	—	—	142	70	—
	28	7,5	50 40	14	7	73,5	40	4
	29 r.	11,0	50	17,5	13,5	122	60	7,5
	29 l.	10,0	50	15,0	10,0	130	65	6
	56	—	35	10	5	90	50	5
Weiber.	19	5	35	10	8,5	80	40	5
	25	7	38	15	—	132	—	10
	39	—	51	—	—	121	—	—
	51	6	30	10	6	70	36	5
	53	6,5	30	—	—	78	37	5
	69	—	—	—	—	78 50	—	—
	81	—	25	8,5	6	—	30	—
Mittel		8	40	12,5	8	89	48	6
Maximum		11,0	51	17,5	13,5	142	70	10
Minimum		5,0	25	8,5	5	50	30	4

Elastische Verwindung pro 1 kg Belastung an einem Torsionshebel von 16 cm Länge, sowie Totalverwindung bis zum Bruche für ein der halben Länge des betreffenden Knochens entsprechendes Mittelstück.

	Alter.		Humerus.	Radius.	Ulna.	Femur.	Tibia.	Fibula.
Männer.	27	Elast. Verwindung	0,14 °	—	—	0,06 °	0,11 °	—
		Totalverwindung	—	—	—	9,0 °	8,3 °	—
	28 r.	Elast. Verwindung	0,26 °	0,96 °	—	0,11 °	0,14 °	2,4 °
		Totalverwindung	13,7 °	21,6 °	—	12,6 °	—	7,2 °
	28 l.	Elast. Verwindung	0,30 °	—	—	—	0,21 °	—
		Totalverwindung	14,8 °	—	—	—	7,2 °	—
	29 r.	Elast. Verwindung	0,17 °	0,91 °	—	0,08 °	0,11 °	2,9 °
		Totalverwindung	12,9 °	17,2 °	—	13,3 °	5,4 °	16,6 °
	29 l.	Elast. Verwindung	0,20 °	0,85 °	0,64 °	0,08 °	0,12 °	3,6 °
		Totalverwindung	12,9 °	14,4 °	7,9 °	13,6 °	8,2 °	15,8 °
	56	Elast. Verwindung	0,23 °	1,36 °	1,0 °	0,05 °	0,18 °	3,9 °
		Totalverwindung	8,3 °	13,3 °	6,8 °	5,6 °	10,1 °	—
Weiber.	19	Elast. Verwindung	0,30 °	1,2 °	—	0,14 °	0,26 °	5,0 °
		Totalverwindung	17,2 °	23,4 °	—	16,2 °	13,0 °	23,9 °
	25	Elast. Verwindung	0,24 °	1,0 °	—	0,08 °	0,10 °	2,8 °
		Totalverwindung	12,2 °	17,2 °	—	13,6 °	—	20,9 °
	39	Elast. Verwindung	—	—	—	0,06 °	—	—
		Totalverwindung	—	—	—	9,0 °	—	—
	51	Elast. Verwindung	0,33 °	0,72 °	—	0,11 °	0,21 °	2,2 °
		Totalverwindung	13,0 °	9,0 °	—	7,9 °	7,2 °	9,0 °
	53	Elast. Verwindung	0,30 °	1,1 °	1,4 °	0,06 °	0,12 °	3,6 °
		Totalverwindung	10,4 °	—	—	5,0 °	5,9 °	22,3 °
	69	Elast. Verwindung	—	—	—	0,08 °	—	—
		Totalverwindung	—	—	—	9,0 °	—	—
		Elast. Verwindung	—	—	—	0,14 °	—	—
		Totalverwindung	—	—	—	10,0 °	—	—
	81	Elast. Verwindung	0,32 °	1,1 °	—	0,09 °	0,18 °	—
		Totalverwindung	7,6 °	10,8 °	—	—	10,8 °	—
	Maximum	Elast. Verwindung	0.33 °	1,36 °	1.4 °	0,14 °	0,26 °	5,0 °
	Minimum		0,14 °	0,7 °	0,64 °	0,05 °	0,10 °	2,2 °
	Maximum	Totalverwindung	17,2 °	23,4 °	7,9 °	16,2 °	13,0 °	23,9 °
	Minimum		7,6 °	9,0 °	6,8 °	5,0 °	5,4 °	7,2 °

Es soll hier bemerkt werden, dass bei gleichen Querschnittsdimensionen die Verwindung um so grösser wird, je länger ein Körper ist. Dagegen hat auf die Torsionsfestigkeit die Länge keinen Einfluss. Bei gleicher Länge wächst die Festigkeit mit dem Cubus der Dicke eines Körpers.

Bei den Knochen speciell wird durch das Anwachsen der Dimensionen nach den Gelenkenden zu die Torsionsfähigkeit beschränkt, und das Vorhandensein eines Hohlraumes und die damit gegebene Vertheilung der Masse nach aussen wirkt in noch höherem Grade als bei der Biegung einer Verwindung entgegen und ist daher für die Tragfähigkeit günstig.

Die aufgewendete Kraft ist selbstverständlich der Länge des Torsionshebels proportional und kann auf eine beliebige Hebellänge umgerechnet werden.

Bei ungleichen Querschnittsdimensionen, wie es bei den Knochen der Fall ist, wird der Torsionsbruch an Stelle des schwächsten Querschnittes erfolgen. Als solche besonders schwache Stellen zeigten sich beim Humerus, Oberschenkel und der Fibula das obere und untere Drittel, beim Radius das obere Drittel, bei der Ulna und der Tibia das untere Viertel und bei der Clavicula die Mitte.

Für die Oberschenkel des 29jährigen Mannes, Versuch 39 und 40 wurde die Ausrechnung der Torsionsfestigkeit und des Elasticitätsmoduls für Torsion vorgenommen.

Die Bestimmung der zur Berechnung nöthigen Werthe geschah in ganz der gleichen Weise wie bei den Biegungsversuchen.[1]

Als Torsionsfestigkeit ergab sich

für Versuch 39 . . . . 580 kg pro qcm
„ „ 40 . . . . 570 „ „ „

Diese Zahlen nähern sich ganz den Rauber'schen Werthen für die Torsionsfestigkeit und sind nur unbedeutend kleiner als die von jenem gefundenen.

Der Elasticitätsmodul für Torsion war

in Versuch 39 . . . 53420 kg pro qcm
„ „ 40 . . . 46660 „ „ „

somit ungefähr $^1/_3$ desjenigen für Biegung, ein Verhältniss wie es sich nahezu auch bei anderen Körpern, z. B. Eisen, Stahl findet.

---

[1] Den Berechnungen lagen die Formeln zu Grunde:

$$\text{Torsionsfestigkeit} = \frac{\mathfrak{M}}{\Theta} \cdot e$$

worin $\mathfrak{M}$ das Moment der äusseren Kraft beim Bruche ist:

für Versuch 39 = 122 × 16
„ Versuch 40 = 130 × 16

Θ das polare Trägheitsmoment des Körpers nahe der Bruchstelle gemessen:

für Versuch 39 = 5,04 bqcm
„ Versuch 40 = 5,424 bqcm

e die Entfernung des äussersten Querschnittspunktes von der Schwerpunktsachse:

für Versuch 39 = 1,50 cm
„ Versuch 40 = 1,55 cm.

$$\text{Elasticitätsmodul für Torsion} = \frac{\mathfrak{M}}{\varphi \times \Theta} \cdot l \frac{360}{2\pi}$$

hier ist $\mathfrak{M}$ = das Moment der äusseren Kraft an der Elasticitätsgrenze in Versuch 39 = 60 × 16
Versuch 40 = 60 × 16

Θ wieder das polare Trägheitsmoment,
l die Länge des Körpers; in beiden Versuchen = 23 cm.
φ der Torsionswinkel in Versuch 39 = 4,7 °
Versuch 40 = 5 °

Als Bruchform wurde bei diesen Versuchen constant eine sogenannte spiralige oder schraubenförmige Fractur erhalten, indem die Bruchlinie in der Form einer Schraube und unter einem Winkel von circa 45° um die ganze Peripherie des Knochens herumlief, wo dann ein den Anfangs- und Endpunkt dieser Schraubenlinie verbindender Längsriss den vollständigen Bruch herbeiführte.

Eine Anzahl derartiger Brüche ist auf Taf. XV abgebildet. Bei dem unvollständigen Bruche der Ulna, Fig. 9, ist die Entstehungsweise des Bruches sehr schön zu sehen, indem die Spirallinie vollständig vorhanden erscheint, während der Längsriss noch nicht eingetreten ist.

Die Schraubenlinie hatte, wie auch Koch[1] bei seinen Experimenten über diese Bruchform beobachtete, constant einen mit der Drehungsrichtung gleichen Verlauf; in allen Fällen war zur Abdrehung das Torsionsrad nach rechts (vom Rade aus in der Richtung der Torsionswelle gegen den Knochen hin gesehen) bewegt worden, und die Schraubenlinie war jedesmal eine rechtsgewundene.

Mechanische Erklärungen dieser Bruchform, die jedoch von einander abweichen, gaben Biermann[2] und Filehne.[3]

Beim Schlüsselbeine erhielt ich, gewiss in Folge der gebogenen Form desselben, durch diese Beanspruchung mehrmals ganz besonders schief verlaufende Schraubenformen, welche als Längsbrüche bezeichnet werden können (Taf. XV, Fig. 2).

Da bei allen diesen Festigkeitsversuchen an den Extremitätenknochen die Kraft immer nur so weit gesteigert wurde, als es zur Ueberwindung der Cohäsion des betreffenden Stückes nöthig war, so wurde, wie voraussichtlich, eine grosse Anzahl unvollständiger Fracturen erhalten und zwar sowohl durch Biegung, als auch durch Zerknickung und Torsion, ferner (wie auch schon Malgaigne[4] fand) an allen Knochen und in allen Lebensaltern, selbst bei einer 81jährigen Frau. Die Tafeln zeigen eine grössere Anzahl derartiger Infractionen und unvollständiger Brüche.

Eine Vergleichung der Ergebnisse bei den Extremitätenknochen der rechten und linken Seite zeigt, dass zwischen rechts und links sehr oft gar keine Unterschiede der Bruchbelastungen bestehen, in anderen Fällen geringe, wie sie durch Verschiedenheiten der Dimensionen beider Seiten bedingt werden. Denn es fanden sich sehr oft nicht nur geringe Verschiedenheiten in der Länge, sondern auch in den Querschnittsdimensionen, wie auch bei genauerer Betrachtung der Schnitte auf Taf. XVI zu erkennen ist.

Fast durchweg bedurften bei allen diesen Beanspruchungen die weiblichen Knochen entsprechend ihrem kleineren und schwächeren Baue auch einer geringeren Belastung zum Bruche als die männlichen. In der Festigkeit dagegen besteht, wie aus der Tabelle über Biegungsfestigkeit sich ersehen lässt, kein Unterschied zwischen den beiden Geschlechtern; bei gleicher Grösse trägt also ein weiblicher Knochen ebenso viel als ein männlicher.

---

[1] Einiges über sogenannte keilförmige und spiralige Fracturen. Langenbeck's Archiv. Bd. XV, p. 689.
[2] Langenbeck's Archiv. Bd. XV.
[3] Berliner klin. Wochenschrift 1874.
[4] l. c.

Festigkeit des lebenden und des todten Knochens und Einfluss der Weichtheile.

Es soll noch erörtert werden, ob die für todte Knochen gefundenen Werthe sich auch direct auf die Festigkeit des lebenden Knochens übertragen lassen.

In dieser Hinsicht wird von Casper[1] besonders hervorgehoben, dass die Widerstandsfähigkeit todter Organe und Gewebe gegenüber jener der lebenden eine grössere sei. Während Casper diese seine Behauptung nur auf sehr primitive Experimente, denen geradezu jede Beweiskraft abgesprochen werden kann, zu stützen vermag, ist Falk[2] durch genauere Versuche an lebenden und todten Thieren zu einem ähnlichen Resultate gelangt und fand speciell, dass die Cohäsion des todten Knochens, wenn auch nicht erheblich, so doch immerhin etwas grösser sei als die des lebenden. Aeby[3] führt dieses Verhalten auf eine Veränderung im Wassergehalte zurück.

Das, worin sich das todte Knochengewebe vom lebenden besonders unterscheidet, ist eine niedrigere Temperatur und, wenn eine Verdunstung überhaupt stattfinden konnte, auch ein geringerer Wassergehalt.

Es frägt sich daher, in wie weit diese beiden Momente, durch welche, wie auch Rauber durch Versuche mit erwärmten und befeuchteten, sowie mit trockenen und kalten Knochenstäbchen fand, die Festigkeit erhöht wird, von Einfluss bei unseren Experimenten gewesen sein konnten.

Ein Wasserverlust hatte wohl kaum statt. Denn die Knochen wurden überhaupt nur von völlig frischen, oft erst wenige Stunden alten Leichen genommen und dann die kurze Zeit bis zum Beginne des Versuchs in Fleischstücke und feuchte Tücher eingeschlagen; ausserdem blieb das Periost belassen, welches einer Austrocknung auch während des Versuchs hinderlich war.

Bezüglich der Temperatur dagegen hatte ich keine besonderen Vorkehrungen getroffen, dieselbe war die gewöhnliche Zimmertemperatur im Sommer.

Wenn es daher zwar denkbar ist, dass in Folge dessen die Festigkeit etwas erhöht wurde, so ist doch zweifellos diese durch die Temperaturdifferenz allein bedingte Festigkeitsverschiedenheit unbedeutend und für die Werthe, mit denen wir zu rechnen hatten, nichts ausmachend; wenigstens war mir sehr auffällig, dass meine Zahlen gerade mit jenen Rauber's übereinstimmen, welche er an feuchten und erwärmten Knochenstäbchen erhalten hatte und dass sie alle niedriger erschienen, als sich nach den bisherigen Berechnungen der Knochenfestigkeit erwarten liess.

Nachdem man in neuerer Zeit schon öfters den Rizzoli'schen Osteoklasten in Verbindung mit einem Dynamometer zur Anwendung brachte, könnten wenigstens für den einen oder anderen gerade passenden Fall die an Leichen ermittelten Zahlen auch noch eine Bestätigung für den normalen[4] Knochen des Lebenden erfahren.

Es bleibt mir noch übrig, die Gründe anzugeben, warum ich nicht die Versuche mit Belassung der Weichtheile angestellt habe, um so die Verhältnisse möglichst ähnlich jenen beim Lebenden zu machen.

Wie leicht einzusehen ist, hat eine solche Art der Prüfung grosse Missstände. Eine Messung der Einbiegung oder Verwindung ist selbstverständlich unmöglich, und das erste Auftreten des Bruches, das oft ganz ruhig geschieht, dürfte vielfach der Beobachtung entgehen.

---

[1] Praktisches Handbuch der gerichtlichen Medicin. 4. Aufl. 1864.

[2] Vierteljahrsschrift für gerichtliche Medicin. N. F. 18. Bd. 1873.

[3] Archiv von Reichert und Du Bois Reymond. 1874.

[4] Maisonneuve brach mehrmals einen gesunden Oberschenkel, um ihn gleich lang wie den verkürzten der anderen Seite zu machen.

Für die Biegung wird es ausserdem bei Belassung der Weichtheile geradezu unausführbar, den Angriffspunkt der Kraft sicher auf eine bestimmte Knochenkante oder Fläche zu verlegen, was doch, wie schon gezeigt, für die Tragfähigkeit von wesentlicher Bedeutung ist.

Da endlich die Festigkeit der Weichtheile nach dem Tode eine andere ist als jene der lebenden Gebilde, so würde das Mitprüfen derselben, falls es überhaupt von Einfluss auf das Resultat ist, nur Fehler bringen und Verwirrung schaffen. Bei Prüfung mit ruhender Belastung, wie es in den Versuchen geschah, ist aber ein Einfluss auf die Tragfähigkeit gerade für die in praktischer Hinsicht wichtigsten Beanspruchungen auf Biegung, Strebfestigkeit, Druck und Torsion kaum anzunehmen.

Denn die Weichtheile setzen einem Drucke fast gar keinen Widerstand entgegen, und so wird, um ein drastisches Beispiel anzuführen, ein fester Stab, der gebogen werden soll, nicht mehr tragen, wenn wir ihn mit einigen Leinwandstücken umwickeln, als ohne dieselben.

Bei Zerreissung allerdings ist es von Bedeutung, ob die Weichtheile entfernt werden oder nicht, indem sie die Last mittragen helfen.

So gibt Pajot an, dass bei einem Kinde die Trennung der oberen Epiphyse des Humerus von der Diaphyse nach Abtrennung der Muskeln aber mit Erhaltung der Kapsel und des Periostes durch eine Belastung mit 19 kg stattfand, während jene am anderen Arme mit Erhaltung aller Weichtheile erst mit 35 kg erfolgte. Wilson fand, dass der seines Periostes beraubte Humerus eines Mannes von 20 Jahren unter einem Zuge von 232 kg, derjenige der anderen Seite mitsammt dem Periost mit 242 kg brach.

Solche geringe Unterschiede in der Tragfähigkeit können, wie unsere Versuche zeigten, allerdings auch durch Formverschiedenheiten beider Seiten bedingt sein.

Eine weitere Angabe, gleichfalls von Wilson, wornach es, um eine Diaphyse, deren Periost unbelassen blieb, abzulösen, eines Gewichtes von 275 kg, bei Entfernung des Periostes an demselben Knochen der anderen Seite eines Gewichtes von 55 kg bedurfte, beruht aber wahrscheinlich auf einem Versuchsfehler; denn darnach hätte das Periost gerade viermal so viel getragen als die Knorpelfuge, was doch kaum anzunehmen ist.

Wenn nun, wie erwähnt, bei Prüfung mit ruhender Belastung für die verschiedenen Beanspruchungsarten mit Ausnahme des Zuges die Weichtheile von höchst untergeordneter Bedeutung sind, so ist das Verhältniss ein anderes bei Stoss, wobei sie die Stosswirkung vielfach abzuschwächen und zu vertheilen vermögen.

Sie sind daher, da beim Lebenden die Knochenbrüche nur höchst selten durch Anwachsen eines Druckes, sondern meist durch Stoss veranlasst werden, gerade für den Fracturmechanismus beim Lebenden von ganz wesentlicher Bedeutung.

Andererseits begünstigt die beim Lebenden vorhandene Muskelaction in vielfacher Weise das Entstehen eines Bruches, und man erklärt sich durch das Fehlen dieses Momentes das seltene Vorkommen von Knochenbrüchen bei hochgradig Betrunkenen und die Schwierigkeit indirecte Fracturen an der Leiche hervorzubringen.

Resultate.

Der Schädel lässt sich durch Längs- oder Querdruck in der Druckrichtung bis zum Bruche nicht unbeträchtlich verkleinern. Dabei erfahren die nicht direct gedrückten Durchmesser, z. B. bei Längsdruck der quere und senkrechte, in den meisten Fällen eine stetige mit dem Drucke zunehmende Vergrösserung. Die letztere ist aber ungemein klein und kann nur durch sehr genaue und zugleich vergrössernde Messinstrumente nachgewiesen werden.

* * *

Die Zusammendrückung in der Druckachse findet nicht gleichmässig über den ganzen Schädel statt, sondern es werden nur die zunächst dem Drucke ausgesetzten Anlagepartien nach innen gebogen.

* * *

Die grösste beobachtete Veränderung in der Druckrichtung bis zum Bruche war 8,8 mm, die grösste Veränderung eines nicht direct gedrückten Durchmessers 1,3 mm.

* * *

Die Formveränderung in der Druckrichtung ist bei Querdruck grösser als bei Sagittaldruck; dem entsprechend trägt in sagittaler Richtung der Schädel eine grössere Belastung als in querer.

* * *

Bei Querdruck war die grösste Formveränderung eines Schädels bis zum Bruche in der Druckrichtung eine Verkleinerung von 8,8 mm, und eine Vergrösserung in sagittaler Richtung von 0,54 mm und in senkrechter Richtung von 0,6 mm.

* * *

Die grösste Veränderung bei Sagittaldruck war im gedrückten Sagittaldurchmesser eine Verkleinerung um 5,4 mm, im senkrechten Durchmesser eine Verkleinerung um 0,36 mm und im queren eine Vergrösserung um 0,7 mm.

* * *

Bei Längsdruck war das Mittel der Bruchbelastung 650 kg, bei Querdruck das Mittel 520 kg.

* * *

In den meisten Fällen brach als der schwächste und sprödeste Theil der Schädelkapsel die Basis cranii ein. Der Bruch erfolgte durch Bersten der am stärksten gedehnten Partie und war constant parallel verlaufend mit der Druckrichtung, bei Querdruck ein Querriss, bei Längsdruck ein Längsbruch.

* * *

Bei Druck vermittelst der Wirbelsäule in senkrechter Richtung auf den Schädel wurden die Condylen des Hinterhauptsbeines sammt dem Türkensattel sowie auch einer oder beider Felsenbeinpyramiden nach innen getrieben.

* * *

Der Bruch erfolgte hier bei einer verhältnissmässig niederen Belastung, welche im Mittel 270 kg betrug, und ohne dass irgend eine Veränderung in den verschiedenen Schädeldurchmessern constatirt werden konnte.

* * *

Bei Druck vermittelst eines Bolzens an verschiedenen Stellen des Schädels wurde der Schädel entsprechend dem Durchmesser des Bolzens einfach durchlocht. Es zeigte sich hiebei, dass die Festigkeit der Schädelkapsel nicht der absoluten Dicke des Schädels proportional ist, sondern dass relativ dünne Stellen mit wenig entwickelter Diploë ebensoviel tragen als dickere, bei welchen die Diploë einen grossen Theil der Dicke ausmacht. Bei Druck auf den äusseren Hinterhauptshöcker brach meist die Schädelbasis der Länge nach.

* * *

Der Unterkiefer trägt bei Druck auf die Kinnspitze entschieden mehr als bei seitlichem Drucke.

* * *

Bei Druck auf die Kieferwinkel erfolgte der Bruch in der Mitte oder nahe der Mitte des Unterkieferkörpers mit einer Belastung, die im Mittel 60 kg betrug. Bei Druck auf die Kinnspitze fand der Bruch am Kieferhalse bei einer mittleren Belastung von 190 kg statt.

* * *

Bei seitlichem Drucke auf den Unterkiefer erfolgte bis zum Bruche eine Annäherung der Kieferäste, welche bis zu 10 mm ausmachte, und bei Druck auf die Protuberantia mentalis ein Auseinandergehen derselben, bis zu 13,3 mm betragend.

* * *

Für die Wirbelkörper waren bei senkrechtem Drucke die Bruchbelastungen von den Hals- bis zu den Lendenwirbeln zunehmend.

* * *

Die Druckfestigkeit der Spongiosa der Wirbelkörper schwankte bei Personen verschiedenen Alters zwischen 22—92 kg pro qcm. Die höchsten Werthe fanden sich bei einem 30jährigen Manne, der niederste bei einem 80jährigen Weibe.

* * *

Durch Druck auf den Thorax in sagittaler Richtung konnte bei jugendlichen Individuen das Sternum der Wirbelsäule vollkommen angelegt werden, ohne dass ein Bruch erfolgte.

* * *

Beim Becken kam durch Druck auf die Symphyse bei einer mittleren Belastung von 250 kg ein meist symmetrischer Bruch der Schambeine zu Stande.

* * *

Bei Querdruck auf die Crista ossis ilei erfolgte die Diastase einer Symphysis sacro-iliaca bei einer mittleren Belastung von 180 kg.

* * *

Bei Querdruck in der Höhe der Acetabula war das Mittel der Bruchbelastung 290 kg. Das Becken wird dabei während des Druckes zu einem Längsoval umgestaltet, und ausser an den vorderen schwachen Partien erfolgt meist noch am Kreuzbeine ein Bruch (Malgaigne's doppelte Verticalfractur).

* * *

Der Oberarm eines 25jährigen Mädchens zerriss bei der Belastung von 800 kg, der Oberschenkel bei 1550 kg Belastung.

* * *

Bei Druck seitlich auf die Mitte langer Röhrenknochen wird der Knochen wie ein zwischen den Fingern zusammengepresstes Schilfrohr eingedrückt, und es entstehen ausgedehnte Längsfissuren. Zum völligen Durchquetschen der Knochen sind dabei ausserordentlich hohe Belastungen erforderlich.

* * *

Bei einer grossen Anzahl der auf Strebfestigkeit geprüften Knochen erfolgte der Bruch nicht an der am meisten gefährdeten Stelle der Mitte, sondern durch Zusammendrücken und Zusammenquetschen an dem einen oder dem anderen der gedrückten Gelenkenden. Letztere müssen daher für diese Art der Beanspruchung als besonders schwache Stellen angesehen werden.

* * *

Es erfolgte ein Zerknickungsbruch der Clavicula

bei Männern im Mittel mit	192	kg
„ Weibern „ „ „	126	„
des Humerus:		
bei einem Weibe mit	600	kg
des Radius:		
bei Männern im Mittel mit	334	kg
„ Weibern „ „ „	220	„
der Ulna:		
bei Männern im Maximum mit	290	kg
„ „ „ Minimum „	180	„
„ Weibern „ Mittel „	132	„
des Femurschaftes:		
im Mittel mit	756	kg
des Femurhalses:		
bei Männern im Mittel mit	815	kg
„ Weibern „ „ „	506	„
der Fibula:		
bei Männern im Mittel mit	61	kg
„ Weibern „ „ „	49	„

* * *

Die Belastungen, welche bei Beanspruchung auf Zerknickung den Bruch an dem einen Ende herbeiführten, waren:

für Oberarm	im	Maximum	880 kg
„ „	„	Minimum	220 „
„ Tibia	„	Maximum	1650 „
„ „	„	Minimum	450 „

Die Tibia zeigte sich widerstandsfähiger gegen Zerknickung als der Oberschenkel.

* * *

Bei Druck in der Richtung des Oberschenkelhalses waren zum Bruche ganz ähnliche Belastungen nöthig wie für den Schenkelhalsbruch durch Strebfestigkeitsanstrengung des Oberschenkels.

* * *

Ein Bruch der Patella bei Druck von vornen nach hinten erfolgte:

bei	Männern	mit	einer	mittleren	Belastung	von . . .	600 kg
„	Weibern	„	„	„	„	„ . . .	420 „

* * *

Bei seitlicher Unterstützung auf $^2/_3$ der ganzen Knochenlänge und Belastung der Mitte erfolgte ein Biegungsbruch:

der Clavicula	bei	Männern	im	Mittel	mit		100 kg
„ „	„	Weibern	„	„	„		62 „
des Humerus	„	Männern	„	„	„		276 „
„ „	„	Weibern	„	„	„		174 „
„ Radius	„	Männern	„	„	„		122 „
„ „	„	Weibern	„	„	„		68 „
„ Ulna	„	Männern	„	„	„		125 „
„ „	„	Weibern	„	„	„		83 „
„ Femur	„	Männern	„	„	„		400 „
„ „	„	Weibern	„	„	„		263 „
der Tibia	bei	Druck auf die innere Fläche:					
	bei	Männern	im	Mittel	mit		275 „
	„	Weibern	„	„	„		190 „
	bei	Druck auf die Crista tibiae:			im	Maximum mit .	500 „
	„	„	„	„	„	Minimum „	240 „
der Fibula	bei	Männern	im	Mittel	mit		45 „
„ „	„	Weibern	„	„	„		31 „

* * *

Das gegenseitige Verhältniss der Belastungen bei dieser Beanspruchung ist:

17	:	17	:	12	:	12	:	6	:	5	:	4	:	2
Femur		Tibia				Humerus		Ulna		Radius		Clavicula		Fibula
		Druck auf die Crista.		Druck auf die innere Fläche.										

* * *

Die Elasticitätsgrenze für Biegung der langen Röhrenknochen war nahe der Hälfte der Bruchbelastung.

* * *

Als Totalausbiegung bis zum Bruche bei obiger Stützweite ergab sich für:

Clavicula	im	Maximum	10,0	mm	im	Minimum	5,3	mm
Humerus	„	„	10,8	„	„	„	4,5	„
Radius	„	„	16,3	„	„	„	5,6	„
Ulna	„	„	13,8	„	„	„	4,4	„
Femur	„	„	11,2	„	„	„	8,6	„
Tibia (Druck auf die innere Fläche)	„	„	13,2	„	„	„	7,3	„
Fibula	„	„	37,9	„	„	„	7,5	„

* * *

Die Biegungsfestigkeit bei den Knochen verschiedener Personen betrug zwischen 1040—1980 kg pro qcm. Sie ist am grössten im mittleren Lebensalter (1800—1980 kg pro qcm bei einem 32jährigen Manne) und nimmt im höheren Alter bedeutend ab.

* * *

Der Elasticitätsmodul für Biegung war bei den Knochen eines 32jährigen Mannes 150,000—180,000 kg pro qcm.

* * *

Die normale Art des Biegungsbruches der Knochen, eine beiderseitige Unterstützung vorausgesetzt, ist das Auseinanderbrechen in drei Fragmentstücke, von denen das mittlere einen Keil darstellt, dessen Basis der Druckrichtung zugekehrt ist und der Stelle, an welcher die Kraft einwirkte, entspricht. Schrägbrüche, die bei Biegung entstehen, lassen sich darauf zurückführen, dass sehr oft nur auf einer Seite des Keiles die vollständige Knochentrennung erfolgt, während es auf der anderen Seite bei einer Fissur bleibt. Auch bei den auf Säulenfestigkeit geprüften Röhrenknochen kommen Annäherungen an eine solche Bruchform vor.

* * *

Durch Torsion mittelst eines Torsionshebels von 16 cm Länge wurde gebrochen:

die Clavicula	durch	eine	mittlere	Belastung	von	8	kg	
der Humerus	„	„	„	„	„	40	„	
„ Radius	„	„	„	„	„	12	„	
die Ulna	„	„	„	„	„	8	„	
der Femur	„	„	„	„	„	89	„	
die Tibia	„	„	„	„	„	48	„	
„ Fibula	„	„	„	„	„	6	„	

* * *

Die Totalverwindung bis zum Bruche betrug für ein der halben Länge des betreffenden Knochens entsprechendes Mittelstück:

beim	Humerus	im	Maximum	17,2°
„	„	„	Minimum	7,6°
„	Radius	„	Maximum	23,4°
„	„	„	Minimum	9,0°

bei der	Ulna	im Maximum	7,9°
„	„	„ Minimum	6,8°
beim	Femur	„ Maximum	16,2°
„	„	„ Minimum	5,0°
bei der	Tibia	„ Maximum	13,0°
„	„	„ Minimum	5,4°
„	Fibula	„ Maximum	23,9°
„	„	„ Minimum	7,2°

* * *

Als Torsionsfestigkeit für die Oberschenkel eines 29jährigen Mannes ergab sich: 570 und 580 kg pro qcm. Der Elasticitätsmodul für Torsion war bei diesen Knochen 46660 und 53420 kg pro qcm, somit ungefähr $^1/_3$ desjenigen für Biegung.

* * *

Bei den Torsionsversuchen wurden constant sogenannte spiralige oder schraubenförmige Fracturformen erhalten. Die Schraubenlinie hatte jedesmal einen mit der Drehungsrichtung gleichen Verlauf.

* * *

Bei den Festigkeitsversuchen an den langen Röhrenknochen wurde eine grosse Anzahl unvollständiger Fracturen erhalten und zwar sowohl durch Biegung als durch Zerknickung und Torsion, ferner an allen Knochen und in allen Lebensaltern.

* * *

Entsprechend ihren kleineren Dimensionen tragen weibliche Knochen meist nur eine geringere Belastung als männliche, die Festigkeit ist aber bei beiden Geschlechtern gleich.

* * *

Zwischen rechts und links bestanden in vielen Fällen gar keine Unterschiede in den getragenen Belastungen, in anderen ganz geringe, wie sie Verschiedenheiten der Dimensionen beider Seiten mit sich brachten.

Abbildungen.

Erklärung der Abbildungen.

I. Festigkeitsapparate.

Tafel I.

Die Werder'sche Festigkeitsmaschine.

Ihre Hauptbestandtheile sind eine hydraulische Presse AB, durch welche die Kraft ausgeübt, und eine Wägevorrichtung, durch welche die Grösse der ausgeübten Kraft erkannt wird.

Durch die hydraulische Presse wird vermittelst der Zugstangen PP das Querstück R von links nach rechts bewegt und von diesem wird in jedem Falle die Kraft für die verschiedenen Festigkeitsarten entnommen. CMN stellen Wagbalken und Wagschale der Wägevorrichtung dar. Beim Gleichgewichtszustande der Wage entsprechen die auf N aufgelegten Gewichte dem 500. Theile der angewendeten Kraft.

Ausser den Hauptbestandtheilen der Maschine zeigt die Figur die Vorrichtung, welche für Druck und Strebfestigkeit meistens benützt wurde. Der zu prüfende Körper, z. B. der auf Strebfestigkeit angestrengte Oberschenkel a in der Figur, wird zwischen Querstück R und Presscylinder A der hydraulischen Presse gebracht und erfährt dann bei der Bewegung von R einen Druck.

Tafel II.

Fig. 1. Vorrichtung für Zugfestigkeit (Werder'sche Maschine).

Der Querkopf S ist feststehend, das Querstück R bewegt sich von links nach rechts. Dadurch wird der zwischen den Mäulern ZZ eingespannte Oberschenkel b auf Zug beansprucht.

Fig. 2. Vorrichtung für Biegungselasticität und Festigkeit (Werder'sche Maschine).

Durch die Zugstangen BB, welche an dem Querstücke R (der Maschine Taf. I) befestigt sind, wird der Wagen A von links nach rechts bewegt, und dadurch das an beiden Enden unterstützte Probestück, in der Figur ein Oberschenkel, auf Biegung angestrengt. Für die Ablesung der Einbiegung dient der an dem festen Gestelle der Maschine angeschraubte und durch einen Faden mit dem Knochen in Verbindung stehende Messapparat.

Fig. 3 zeigt in natürlicher Grösse auf dem Querschnitte eines Oberarmes die Befestigung des Messfadens am Knochen durch eine federnde Klammer.

Fig. 4. Der Messapparat zur Bestimmung der Einbiegung. Sein Uebersetzungsverhältniss ist 1 : 10.

Tafel III.

Fig. 1. Anordnung bei den Versuchen über Schädelelasticität (Werder'sche Maschine).

Zwischen der ebenen Wand des Wagens *A* und jener der Platte *b* ist der Schädel einem Drucke ausgesetzt.

Die Verkleinerung des Schädels in der Druckrichtung wurde aus der Annäherung der Stirnwand des Wagens gegen die Platte *b* direct bestimmt, während die Veränderung in den beiden senkrecht auf der Druckrichtung stehenden Durchmessern durch 2 Messgabeln in fünffacher Vergrösserung angegeben wurde.

Fig. 2 zeigt eine solche Messgabel und zugleich das Verfahren bei der Messung.

Fig. 3. Versuchsanordnung bei Anwendung concentrirten Druckes vermittelst eines Druckbolzens auf den Schädel (Werder'sche Maschine).

Fig. 4. Vorrichtung für Biegung durch directe Belastung.

Der Knochen ruht seitlich auf den Winkeln *dd* und die Belastung findet in seiner Mitte statt. Der Messapparat für die Bestimmung der Ausbiegung ist oberhalb des Knochens angebracht.

Tafel IV.

Fig. 1. Der Torsionsapparat.

Das eine rechts befindliche Ende des zu torquirenden Oberschenkels ist in einer Klemme festgehalten, und an dem anderen, linkerseits in einem Einspannkopfe befindlichen kommt die Torsionskraft zur Wirkung.

Bei Anziehen des Flaschenzuges findet eine Anspannung des Zugstranges, und dadurch eine Drehung des Rades und der Torsionswelle von rechts nach links statt, an welcher Drehung das in dem Kopfe eingespannte Knochenende theilnimmt.

Die Grösse der Kraft wird an dem eingeschalteten Federdynamometer abgelesen, und die Grösse der Verwindung für eine bestimmte Knochenstrecke auf zwei Gradbogen mittelst zweier auf den Knochen aufgeklemmter Zeiger ermittelt.

Fig. 2 zeigt den Einspannkopf mit seinen Schrauben und Holzlagern zur Befestigung des torquirten Knochenendes und

Fig. 3 die Holzlager allein für das untere Ende eines Oberschenkels.

Fig. 4. Der Messzeiger für die Verwindung in natürlicher Grösse auf dem Querschnitte eines Oberarmes.

II. Bruchformen.

Tafel V.

Typen von Basisfracturen bei Querdruck auf den Schädel.

Tafel VI.

Typen von Basisfracturen bei Längsdruck auf den Schädel.

Tafel VII.

Fig. 1. Bruchform bei Druck vermittelst der Wirbelsäule in senkrechter Richtung auf den Schädel.

Die seitliche und vordere Umrandung des Hinterhauptsloches sammt dem Türkensattel und den Felsenbeinpyramiden ist nach innen getrieben.

Fig. 2—6. Impressionen durch concentrirten Druck vermittelst eines Druckbolzens an verschiedenen Stellen des Schädels erzeugt.

Fig. 2. Eine solche Impression des Stirnbeines von aussen gesehen.

Fig. 3. Dieselbe von innen.

Fig. 4. Impression des Schläfenbeines in der Ansicht von aussen.

Fig. 5 und 6. Impressionen der Seitenwandbeine von innen gesehen.

Tafel VIII.

Fig. 1 und 2. Bruch des Unterkieferkörpers bei seitlichem Drucke auf die Kieferwinkel.

Fig. 3. Vollständiger und

Fig. 4 unvollständiger Bruch des Unterkieferhalses bei Längsdruck auf den Unterkiefer von der Kinnspitze gegen die Gelenkfortsätze.

Fig. 5—8. Compressionsfracturen der Wirbelkörper bei senkrechtem Drucke:

Fig. 5 eines Halswirbels,

Fig. 6 eines Brustwirbels,

Fig. 7 und 8 zweier Lendenwirbel.

Fig. 9. Beckenbruch bei Druck auf das Becken in der Richtung von vornen nach hinten (Symphysis pubis zum Kreuzbeine).

Tafel IX.

Beckenfracturen bei Querdruck auf das Becken in der Höhe der Acetabula.

In Fig. 1 ist die seitliche Zusammendrückung und Ineinanderschiebung der Spongiosa der vorderen Kreuzbeinwand deutlich erkennbar.

Tafel X.

Durch Zerreissung erzeugte Brüche:

Fig. 1. Sehr langer Schrägbruch des Oberarmes nahe dem oberen Gelenkende.

Fig. 2. Schrägbruch nahe dem unteren Gelenkende des Oberschenkels.

Durch seitlichen Druck auf die Mitte langer Röhrenknochen hervorgebrachte, ausgedehute Längsfissuren.

Fig. 3 des Oberarmes,

Fig. 4 der Ulna,

Fig. 5 der Tibia.

Brüche bei Beanspruchung der Extremitätenknochen auf Strebfestigkeit.

(Es erfolgte dabei sehr oft der Bruch nicht an der durch die Beanspruchung am meisten gefährdeten Stelle der Mitte, sondern durch Zusammendrücken und Zusammenquetschen an dem einen oder dem anderen der zunächst gedrückten Enden.)

Fig. 6. Querfractur der Clavicula.

Fig. 7. Schrägfractur der Clavicula.

Fig. 8. Unvollständiger Bruch der Clavicula.

Fig. 9. Sehr schräg verlaufender unvollständiger Schlüsselbeinbruch.

Fig. 10. Bruch des Oberarmes unterhalb der Tubercula mit Einkeilung der Diaphyse in den Oberarmskopf.

Fig. 11. Ein ganz ähnlicher Bruch im Längsdurchschnitte.

Der Schaft erscheint vollständig quer gebrochen und in das Caput humeri eingekeilt.

Fig. 12. Längsbruch des Oberarmskopfes.

Tafel XI.

Brüche bei Beanspruchung der Extremitätenknochen auf Strebfestigkeit.

Fortsetzung.

Fig. 1. Unvollständiger Bruch des Oberarmes unmittelbar über der Rolle.

Fig. 2. Einkeilung des Oberarmsschaftes in das untere Gelenkende.

Fig. 3. Splitterbruch des Oberarmes nahe dem unteren Gelenkende.

Fig. 4. Splitterbruch im unteren Drittel des Oberarmes.

(In Fig. 3 und 4 sind die Fragmentstücke wieder zusammengesetzt.)

Fig. 5. Querbruch des Oberarmes im unteren Drittel.

Fig. 6. Einkeilung des Radiusschaftes in das Köpfchen.

Fig. 7. Bruch am unteren Gelenkende des Radius.

Fig. 8. Querbruch der Mitte des Radius.

Fig. 9. Schrägbruch des Radius in seiner Mitte. Am oberen Fragmentstücke umschreibt eine Fissur die Form eines Keiles.

Fig. 10. Querbruch des Radius in seiner Mitte mit Längsfissur am unteren Fragmentstücke.

Fig. 11. Infraction der Mitte des Radius.

Fig. 12. Einkeilung des Schaftes der Ulna in das Köpfchen.

Fig. 13. Bruch des Olecranons.

Fig. 14. Querbruch etwas unter der Mitte der Ulna.

Fig. 15. Schrägbruch etwas unter der Mitte der Ulna.

In Fig. 14 und 15 umschreiben Fissuren am oberen und am unteren Fragmentstücke eine Keilform.

Fig. 16 und 17. Infractionen der Ulna etwas unterhalb ihrer Mitte.

Fig. 18. Infraction nahe dem unteren Ende der Ulna.

Fig. 19 und 20. Brüche des Oberschenkelhalses.

Fig. 21. Einkeilung des Schaftes des Oberschenkels in die untere Epiphyse.

Tafel XII.

Brüche bei Beanspruchung der Extremitätenknochen auf Strebfestigkeit.

Fortsetzung.

Fig. 1. Splitterbruch des unteren Gelenkendes des Femur.

Fig. 2. Unvollständiger Längsbruch des Oberschenkelhalses.

Fig. 3. Infraction im unteren Viertel des Oberschenkels.

Fig. 4 und 5. Splitterbrüche im oberen Drittel des Oberschenkelschaftes.

Die aneinander gelegten Fragmentstücke setzen in beiden Fällen eine Keilform zusammen.

Fig. 6. Einkeilung des Tibiaschaftes in das obere Gelenkende.

Fig. 7. Bruch am unteren Gelenkende der Tibia.

Fig. 8. Querbruch der Mitte der Fibula.

Fig. 9 und 10. Schrägbruch der Mitte der Fibula. Fissuren umgrenzen an den unteren Fragmentstücken eine Keilform.

Fig. 11. Unvollständiger Bruch nahe dem oberen Gelenkende der Fibula.

Durch Druck in der Richtung des Schenkelhalses erzeugte Schenkelhalsbrüche.

Fig. 12. Einkeilung des Schenkelhalses in den Kopf.

Fig. 13. Einkeilung des Schenkelhalses in den Schaft des Knochens.

Fig. 14. Typische Bruchform der Patella bei Druck in der Richtung von vornen nach hinten.

Tafel XIII.

Mittelst Biegung erhaltene Brüche der Mitte langer Röhrenknochen.

Bei der in der Tafel gewählten Lage sämmtlicher Knochen geht die Richtung der Durchbiegung von vornen und oben nach hinten und unten.

Fig. 1. Scharfer Querbruch des Radius.

Fig. 2. Scharfer Querbruch des Oberschenkels.

Fig. 3. Gezackter Schrägbruch der Ulna.

Fig. 4. Gezackter Querbruch der Clavicula.

Fig. 5. Zackiger Querbruch des Radius.

Fig. 6. Zackiger Schrägbruch des Oberarmes.

Fig. 7. Zackiger Querbruch des Oberschenkels mit ausgedehnter Längsfissur am oberen Fragmentstücke.

Fig. 8. Zackiger Schrägbruch der Fibula mit Längsfissur im unteren Fragmente.

Fig. 9. Infraction der Clavicula.

Fig. 10. Infraction des Oberarmes.

Fig. 11. Infraction mit Längsfissur des Radius.

Fig. 12. Infraction mit Längsfissur der Ulna.

Fig. 13. Infraction der Ulna.

Fig. 14. Unvollständiger Bruch der Tibia.

Fig. 15. Infraction der Fibula.

Die Längsfissuren entsprechen der Concavität des Knochens bei der Ausbiegung.

Tafel XIV.

Mittelst Biegung erhaltene Brüche der Mitte langer Röhrenknochen.

Fortsetzung.

Die Richtung der Durchbiegung ist durch den Pfeil angedeutet.

In mehreren Fällen erfolgte bei den Biegungsversuchen an der Stelle, an welcher die Kraft ihren Angriffspunkt hatte, die Aussprengung eines keilförmigen Stückes aus dem Knochen.

Fig. 1 und 2. Splitterbrüche des Oberschenkels mit Aussprengung des characteristischen Keiles.

Fig. 3 und 4. Dessgleichen der Fibula.

Wenn auch ein solch ausgesprochener Bruch nur einigemale statthatte, so fanden sich doch in den meisten Fällen Andeutungen desselben in der Form von Fissuren, die eine Keilform umgrenzten, wie bei sämmtlichen nachfolgenden Brüchen:

Fig. 5. Querbruch des Oberarmes.

Fig. 6. Querbruch des Radius.

Fig. 7. Querbruch des Oberschenkels.

Fig. 8. Schrägbruch des Oberschenkels.
Fig. 9. Schrägbruch des Oberarmes.
Fig. 10. Schrägbruch des Radius.
Fig. 11. Schrägbruch der Ulna.
Fig. 12 und 13. Schrägbruch des Oberschenkels.
Fig. 14 und 15. Schrägbruch der Tibia.
Fig. 16. Schrägbruch der Fibula.
Fig. 17. Unvollständiger Bruch der Clavicula.
Fig. 18. Unvollständiger Bruch der Tibia.

Tafel XV.

Torsionsbrüche.

Die Torquirung fand jedesmal in der Richtung nach rechts (wenn man vom Torsionsrade gegen den Knochen hinsieht) statt. Die Bruchform war constant eine sogenannte spiralige oder schraubenförmige, und die Schraubengänge haben sämmtlich den gleichen, nach rechts aufsteigenden Verlauf.

Setzt man bei den Splitterbrüchen die einzelnen Fragmentstücke zusammen, so ergibt sich als Hauptbruch gleichfalls die characteristische Schraubenlinie.

Fig. 1. Bruch der Mitte der Clavicula.
Fig. 2. Sehr lang gezogener unvollständiger Bruch der Clavicula.
Fig. 3. Bruch nahe dem oberen Ende des Oberarmes.
Fig. 4. Splitterbruch des Oberarmes nahe dem unteren Gelenkende.
Fig. 5. Bruch des Radius nahe dem oberen Ende.
Fig. 6. Dessgleichen nahe dem unteren Gelenkende.
Fig. 7. Splitterbruch der Mitte des Radius.
Fig. 8. Bruch der Ulna nahe dem unteren Ende.
Fig. 9. Unvollständiger Bruch der Ulna nahe ihrem unteren Gelenkende.
Fig. 10. Bruch des Femur nahe dem Schenkelhalse.
Fig. 11. Bruch im unteren Drittel des Oberschenkels.
Fig. 12. Bruch der Mitte des Femur mit weit sich fortsetzenden Ausläufern des Schraubenganges.
Fig. 13. Bruch in der Nähe des unteren Gelenkendes der Tibia.
Fig. 14. Bruch der Fibula nahe ihrem unteren Ende.

III. Knochenquerschnitte.

Tafel XVI.

Querschnitte von der Mitte der auf Biegung beanspruchten Oberarme, Oberschenkel und Schienbeine, für welche der Festigkeitsmodul ausgerechnet worden war.

Diese Schnitte wurden erhalten dadurch, dass die Mitte des Knochens, die Bruchstelle glatt abgefeilt, mit Druckschwärze bestrichen und dann auf Papier abgedruckt wurde.

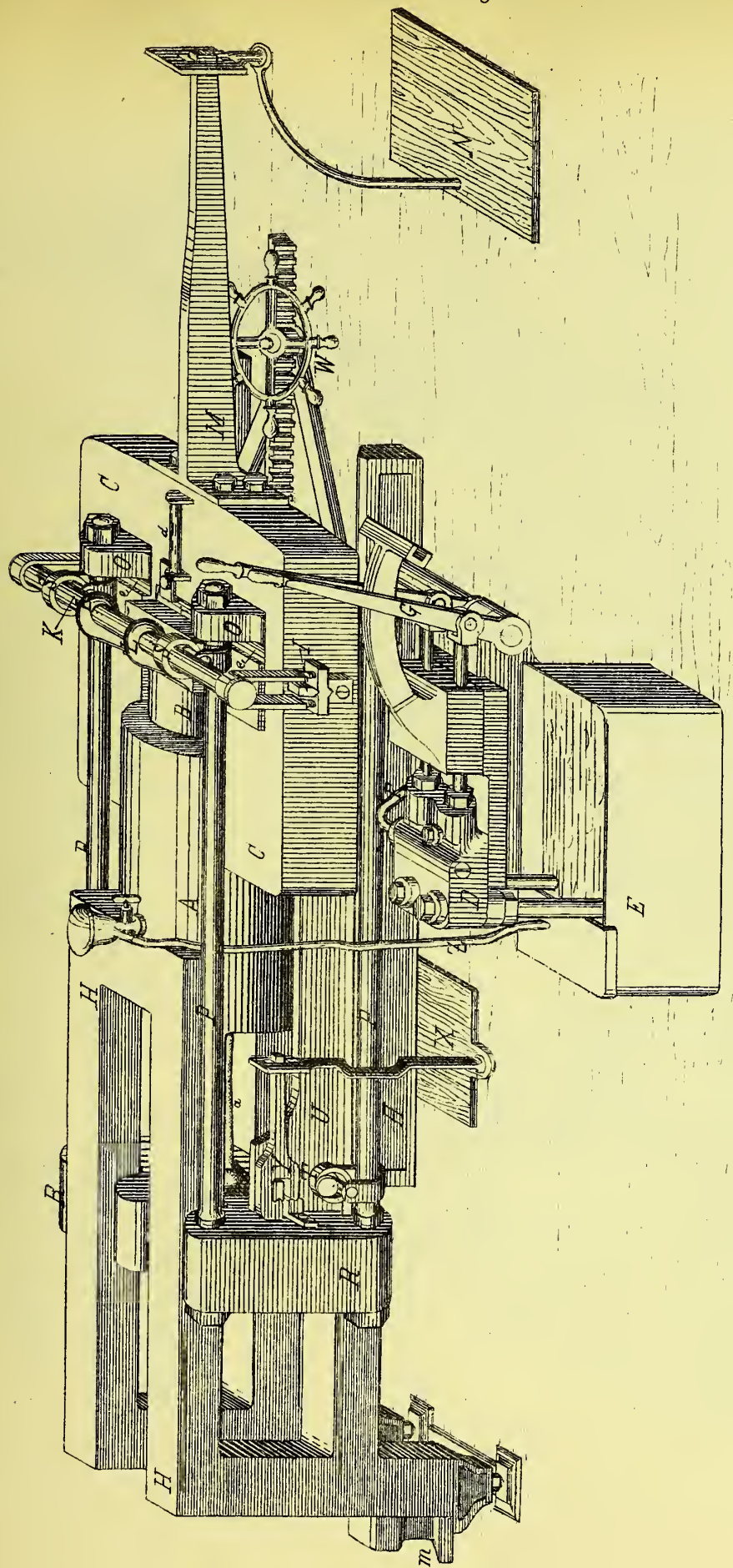
In der Tafel sind diese Abdrücke getreu wiedergegeben. Die Zahlen innerhalb der Knochenringe zeigen das Alter der betreffenden Personen an, der Pfeil die Richtung des Druckes.

Nachstehend sind die zugehörigen Versuchsnummern angeführt.

Humerus, Männer, Alter:	18 Jahre,		Versuchs-Nro.	17
	24 „		„	18
	32 „	rechts	„	19
	32 „	links	„	29
	38 „		„	14
	49 „		„	20
	75 „		„	21
	78 „		„	22
Weiber, Alter:	18 „	rechts	„	15
	18 „	links	„	16
	20 „		„	23
	24 „		„	24
	32 „		„	25
	51 „		„	26
	74 „		„	27
	82 „		„	28

Femur, Männer, Alter:	5½ Jahre,		Versuchs-Nro.	69
	18 „		„	56
	24 „		„	57
	32 „	rechts	„	58
	32 „	links	„	70
	49 „		„	59
	62 „	rechts	„	60
	62 „	links	„	71
	75 „		„	61
	78 „		„	62
Weiber, Alter:	20 „		„	63
	24 „		„	64
	32 „		„	65
	51 „		„	66
	74 „		„	67
	82 „		„	68

Tibia, Männer, Alter:	18 Jahre,		Versuchs-Nro.	73
	24 „		„	74
	32 „	rechts	„	79
	32 „	links	„	86
	38 „		„	72
	49 „		„	80
	75 „		„	75
	78 „		„	81
Weiber, Alter:	20 „		„	82
	24 „		„	83
	32 „		„	84
	51 „		„	85
	74 „		„	76
	82 „		„	77


N
W
C
K
G
E
H
R
m

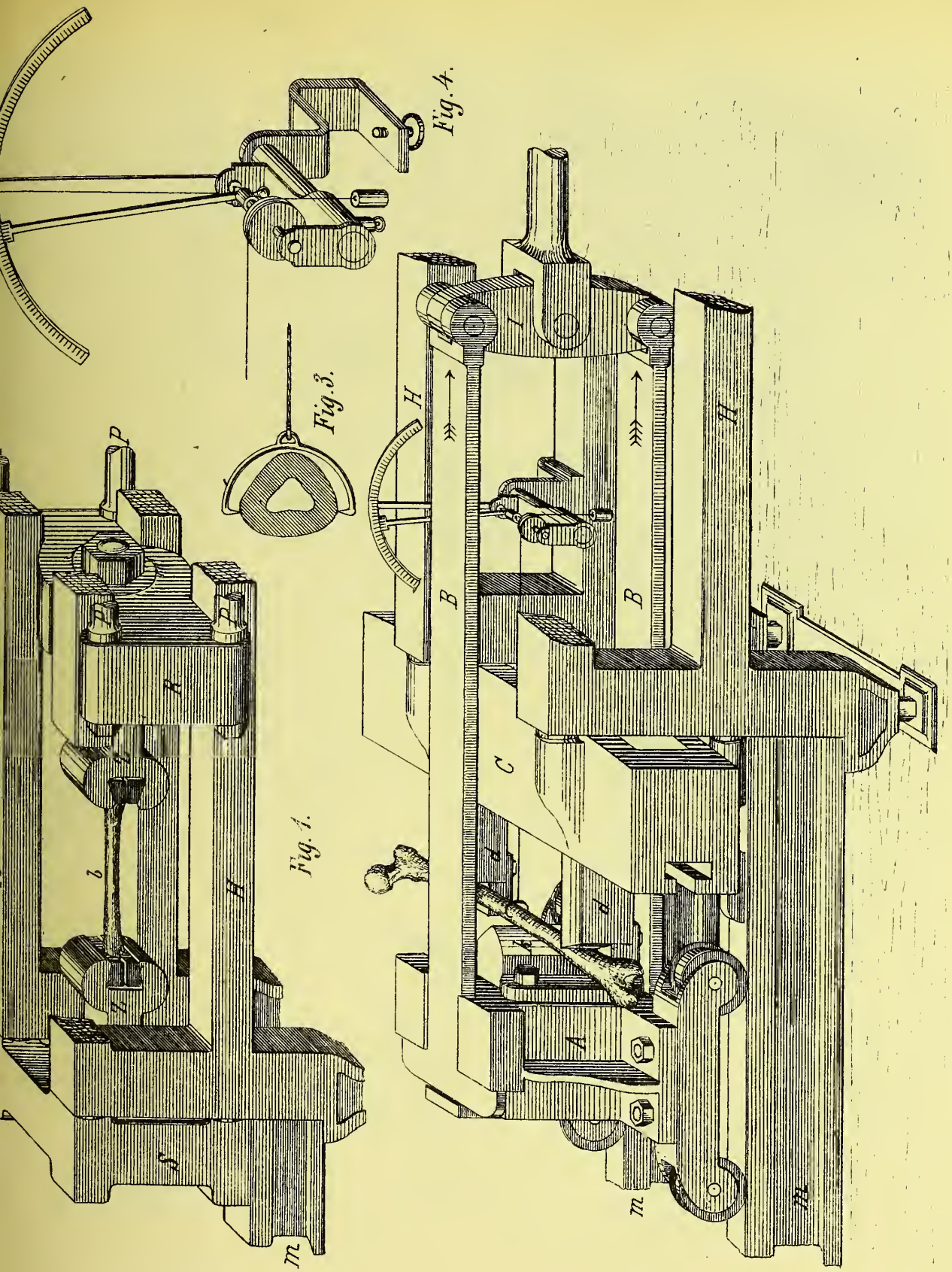


Fig. 1.
Fig. 2.
Fig. 3.
Fig. 4.
P
R
b
H
S
m
B
C
A
d
I

Fig. 1.

Fig. 2.

Fig. 3.

Fig. 4.

Fig. 3.

Fig. 2.

Fig. 4.

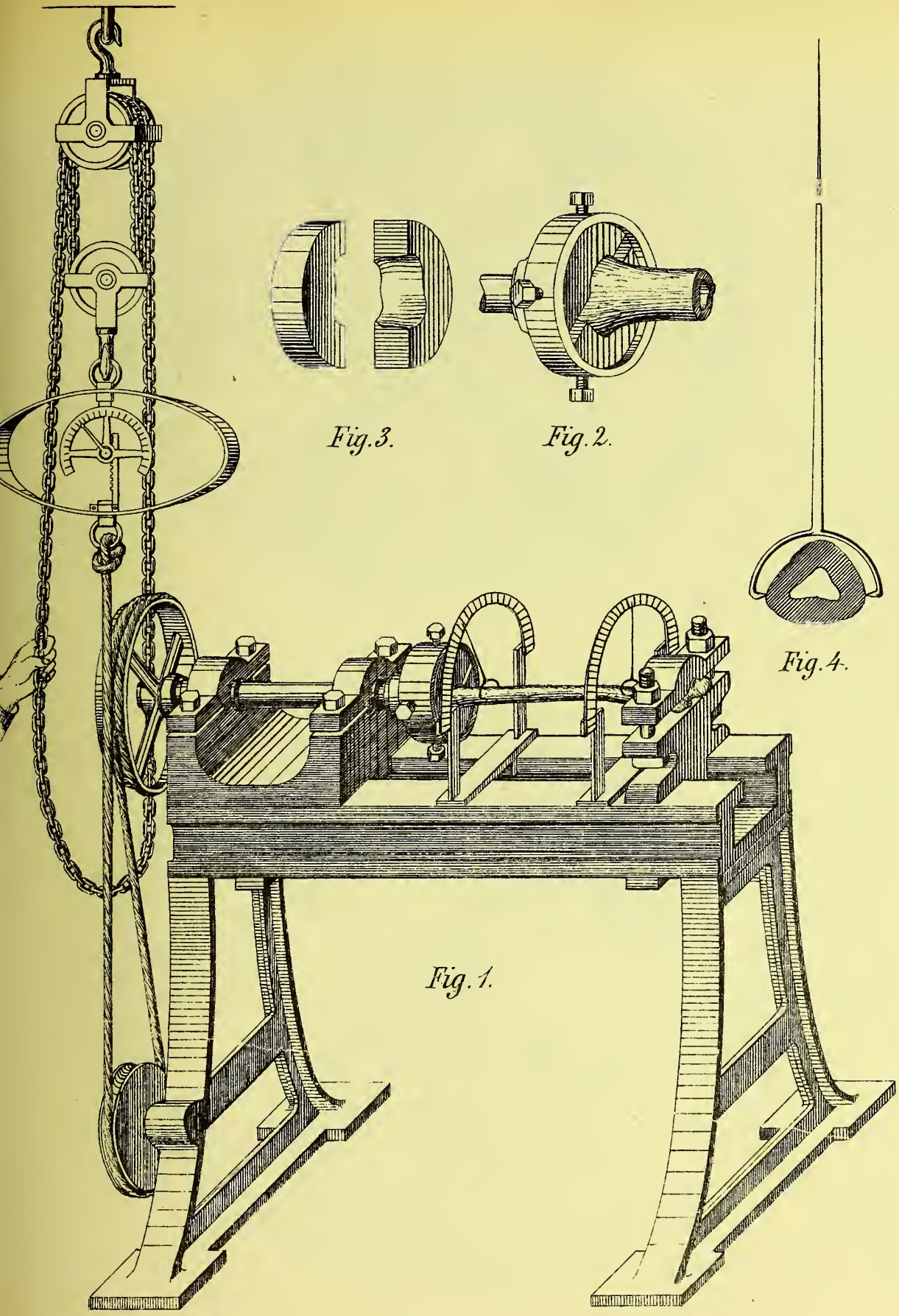


Fig. 1.

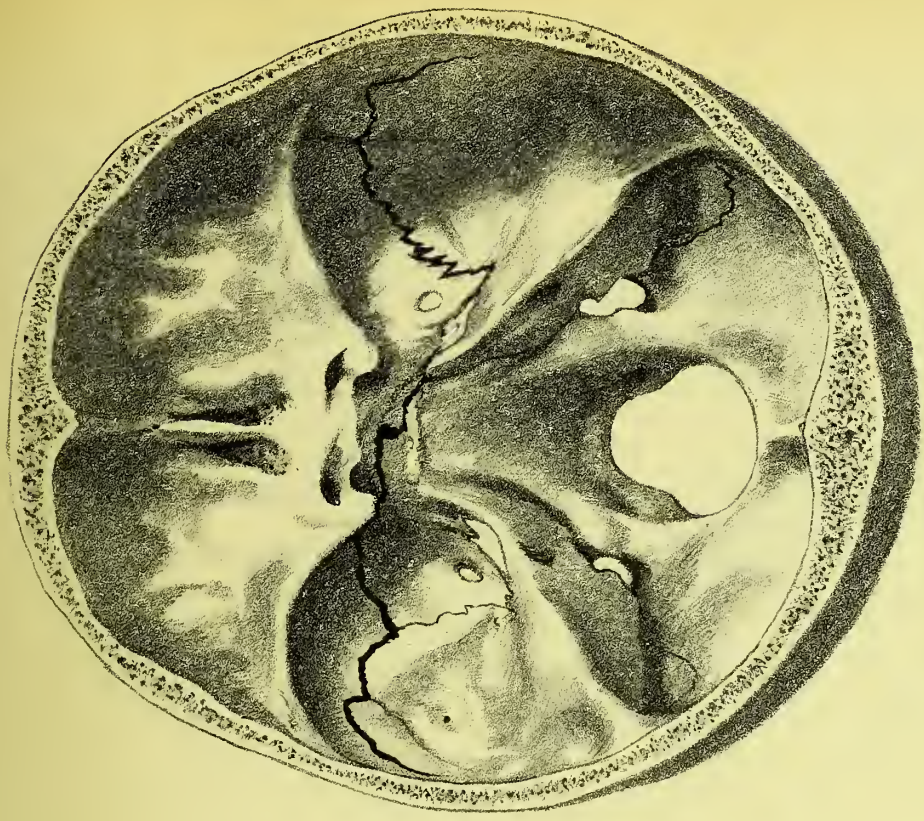


Fig. 2.

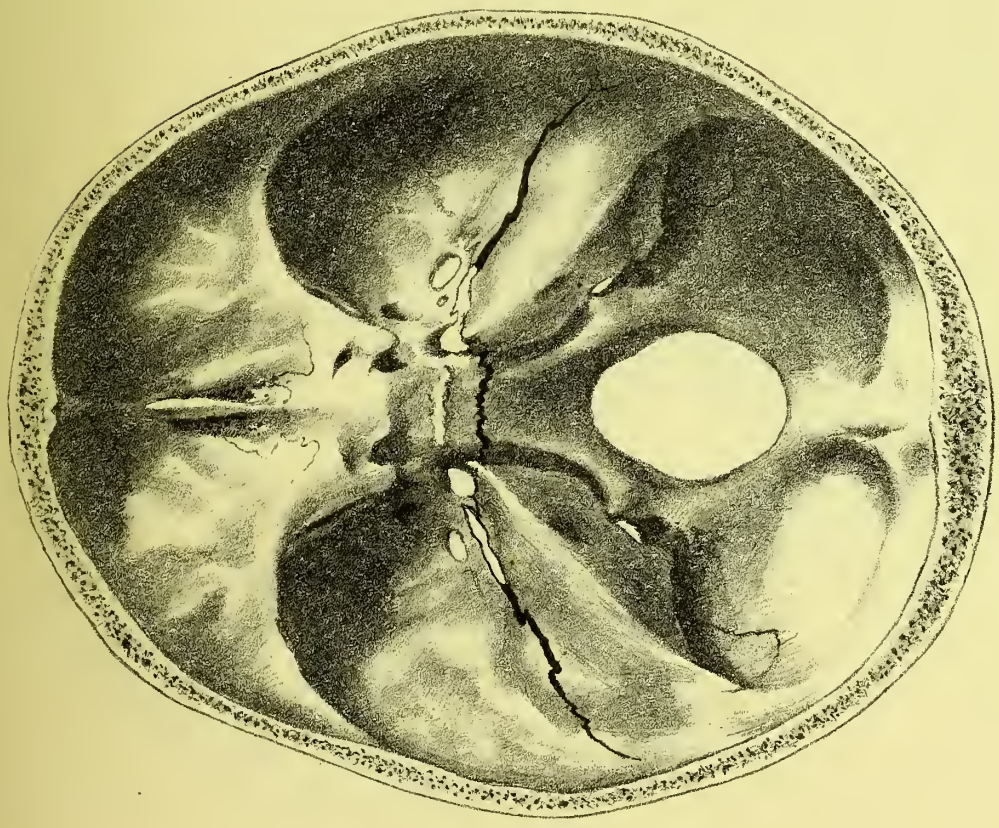


Fig. 1.

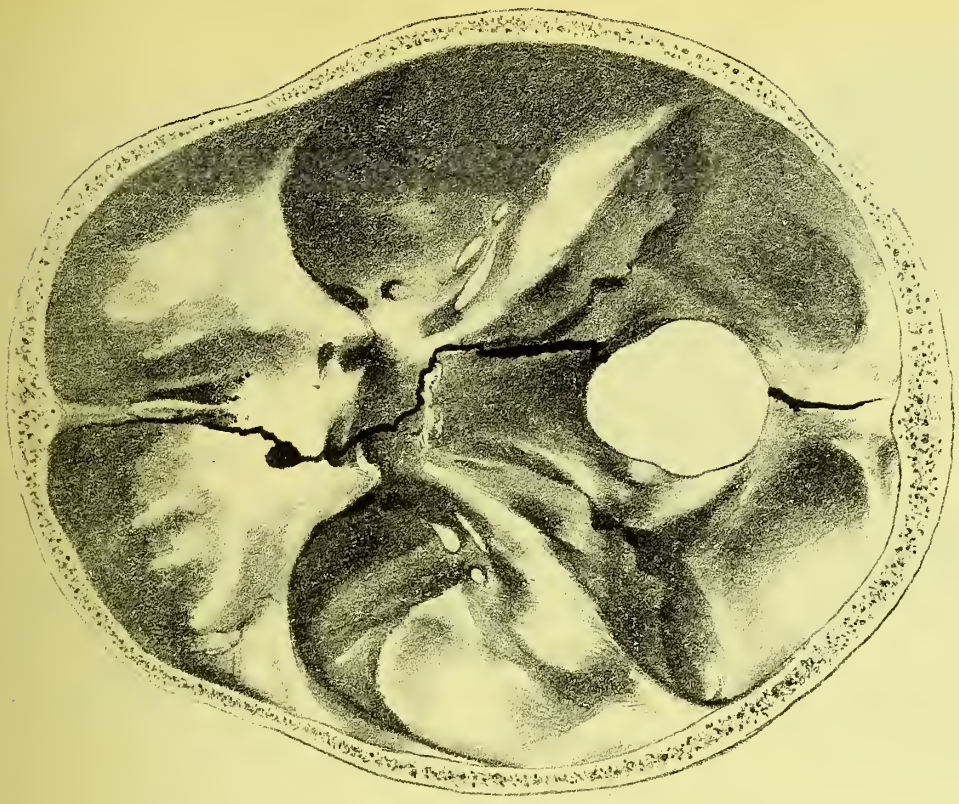


Fig. 2.

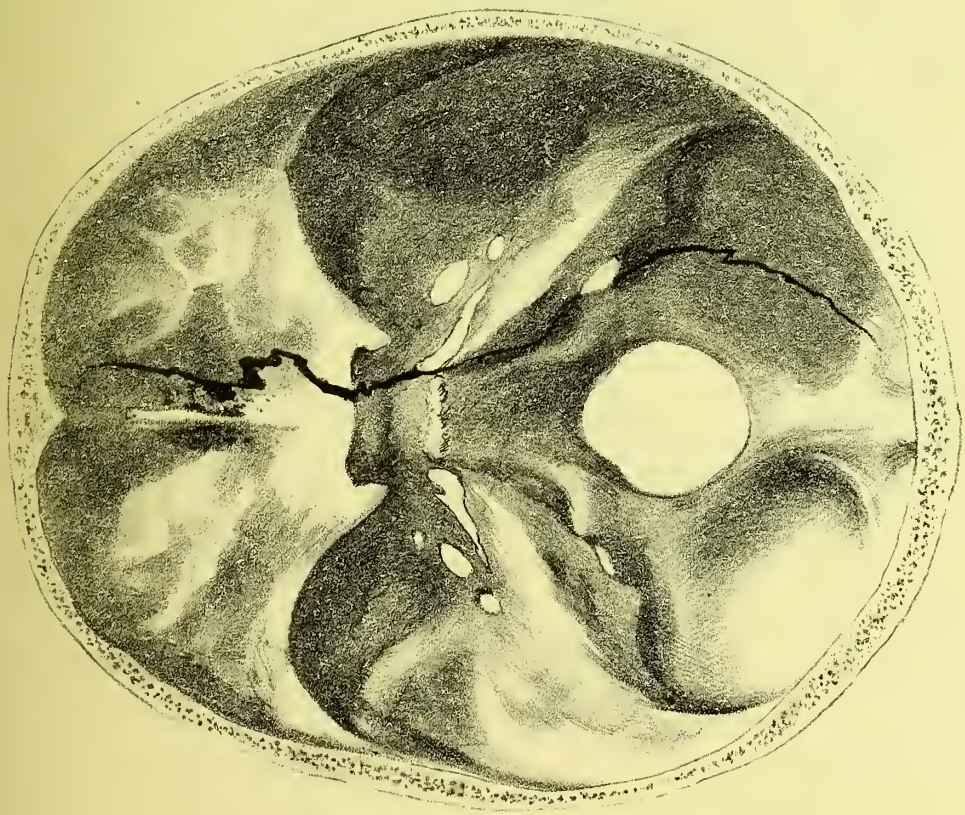


Fig. 1.

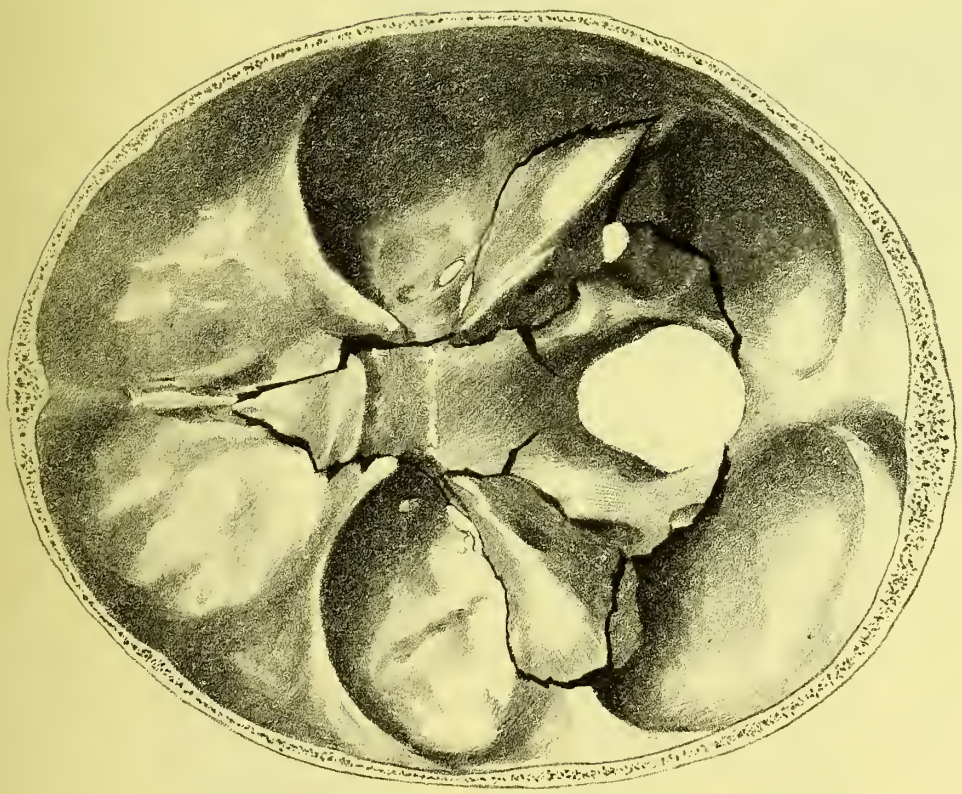
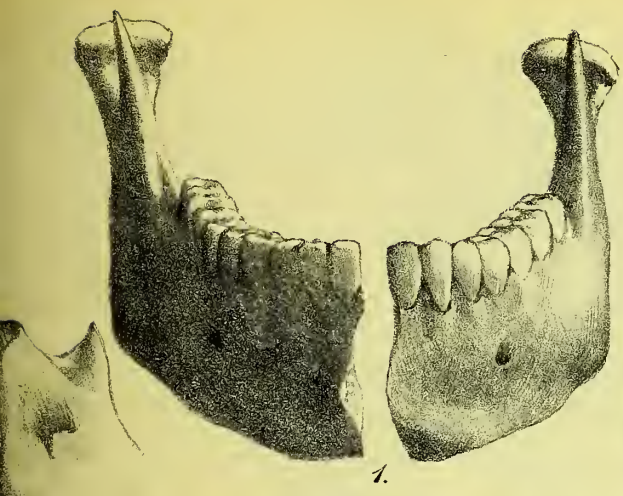
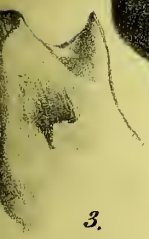


Fig. 1.



1.

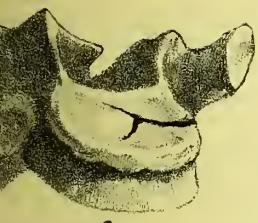
2.



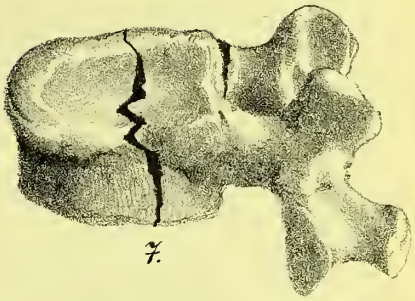
3.

4.

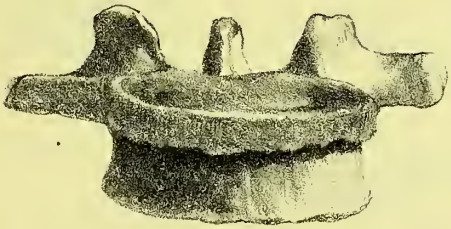
5.



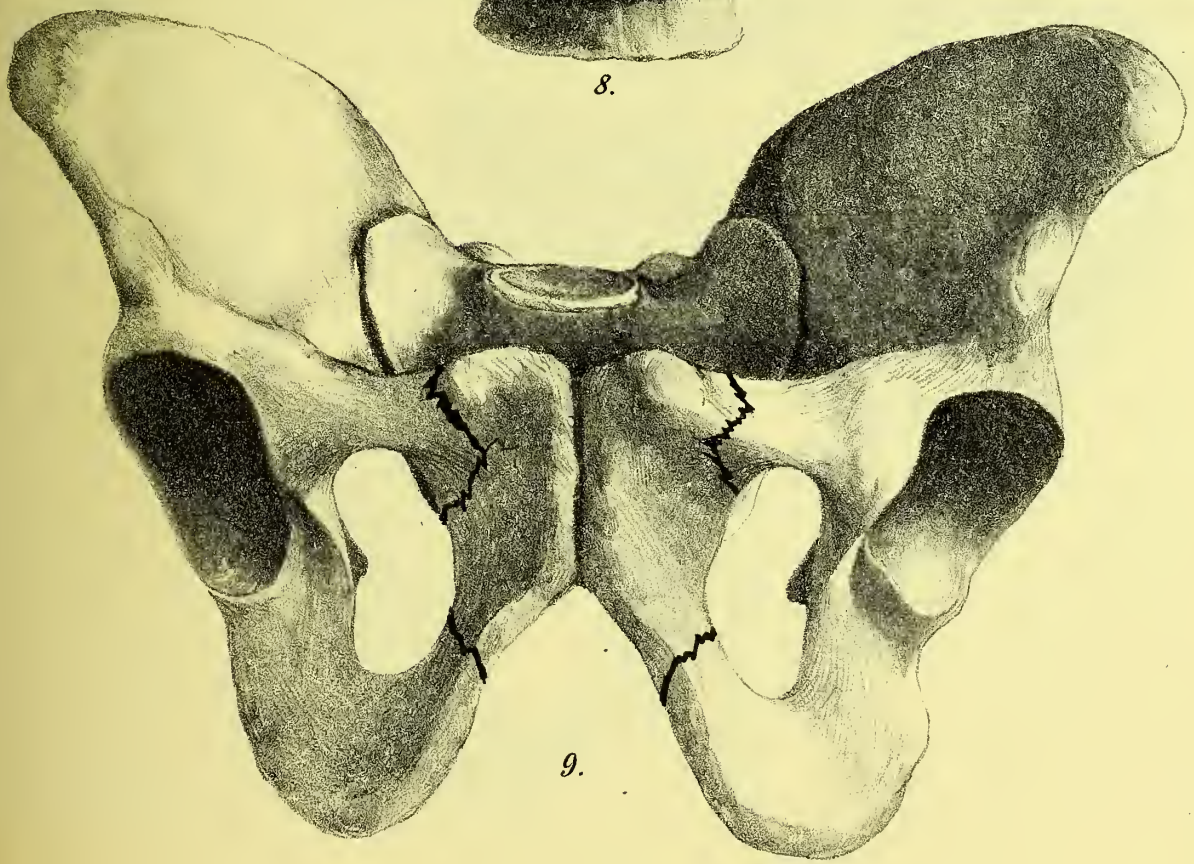
6.



7.



8.



9.

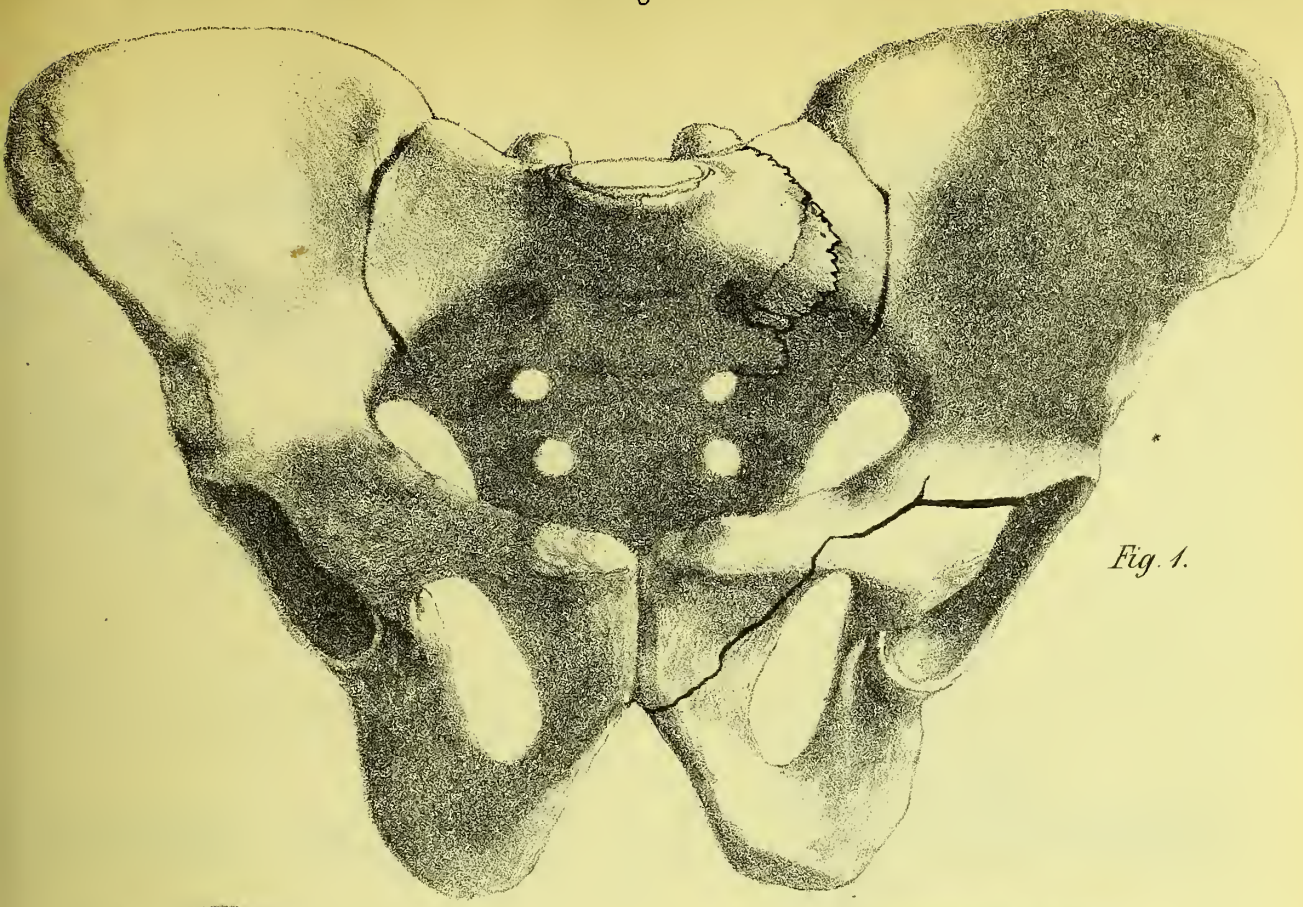


Fig. 1.

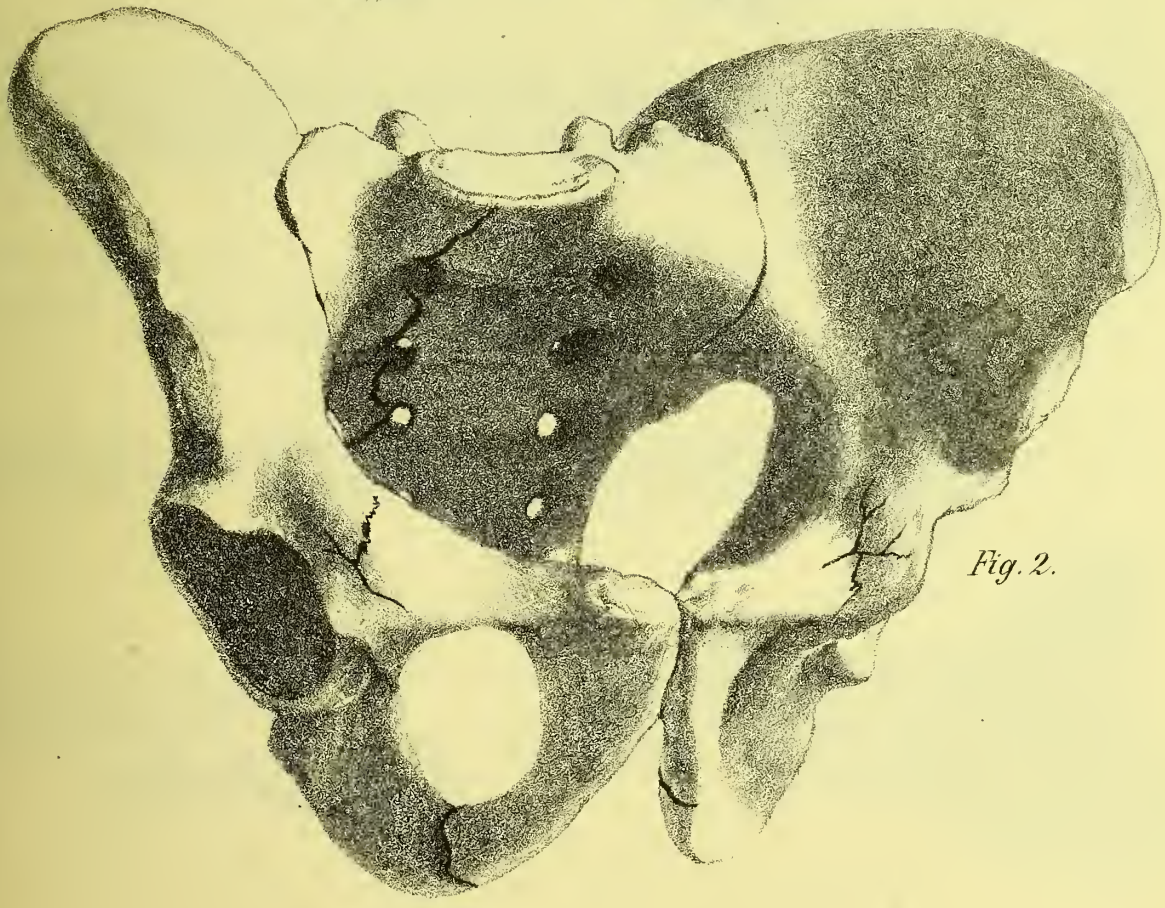
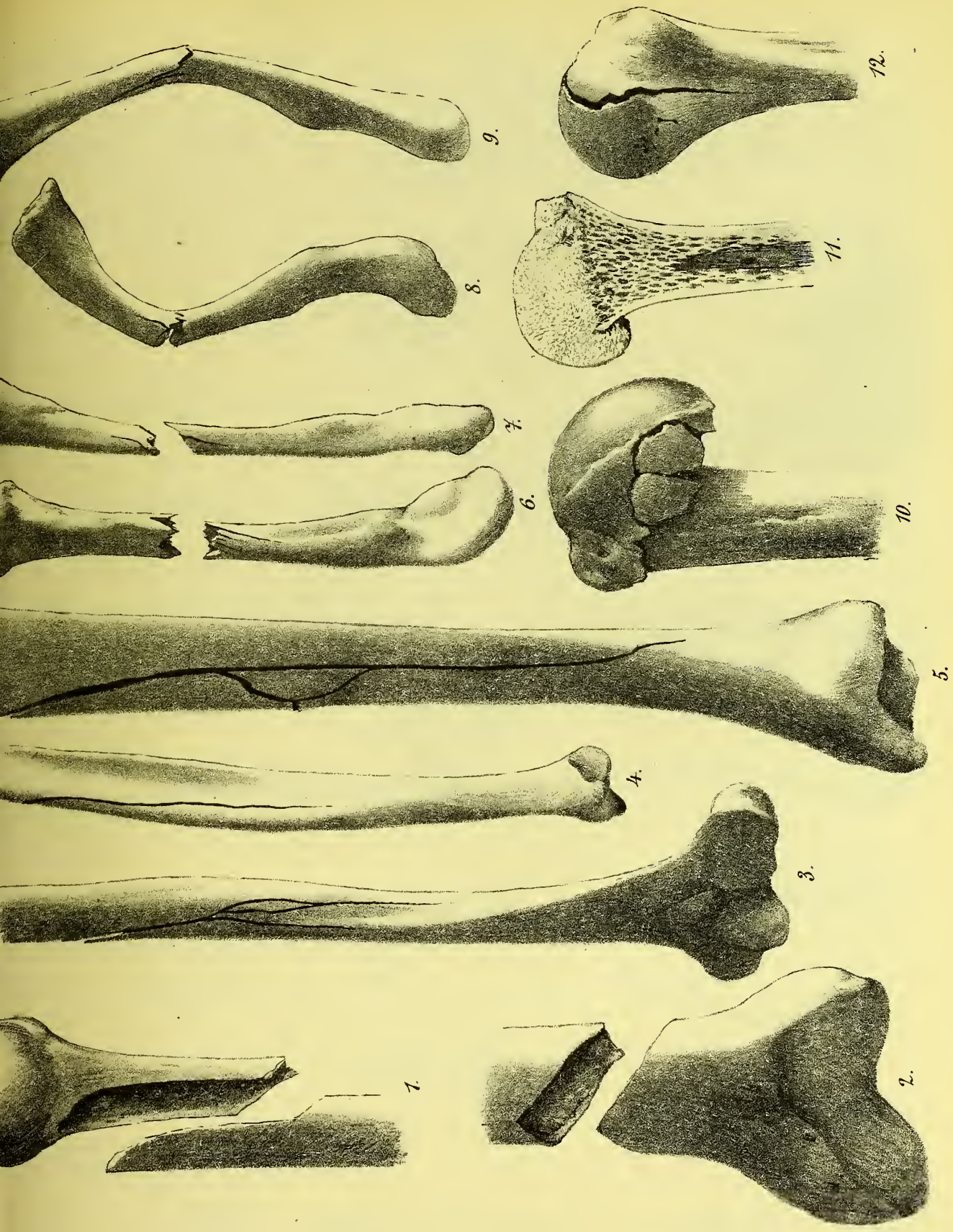
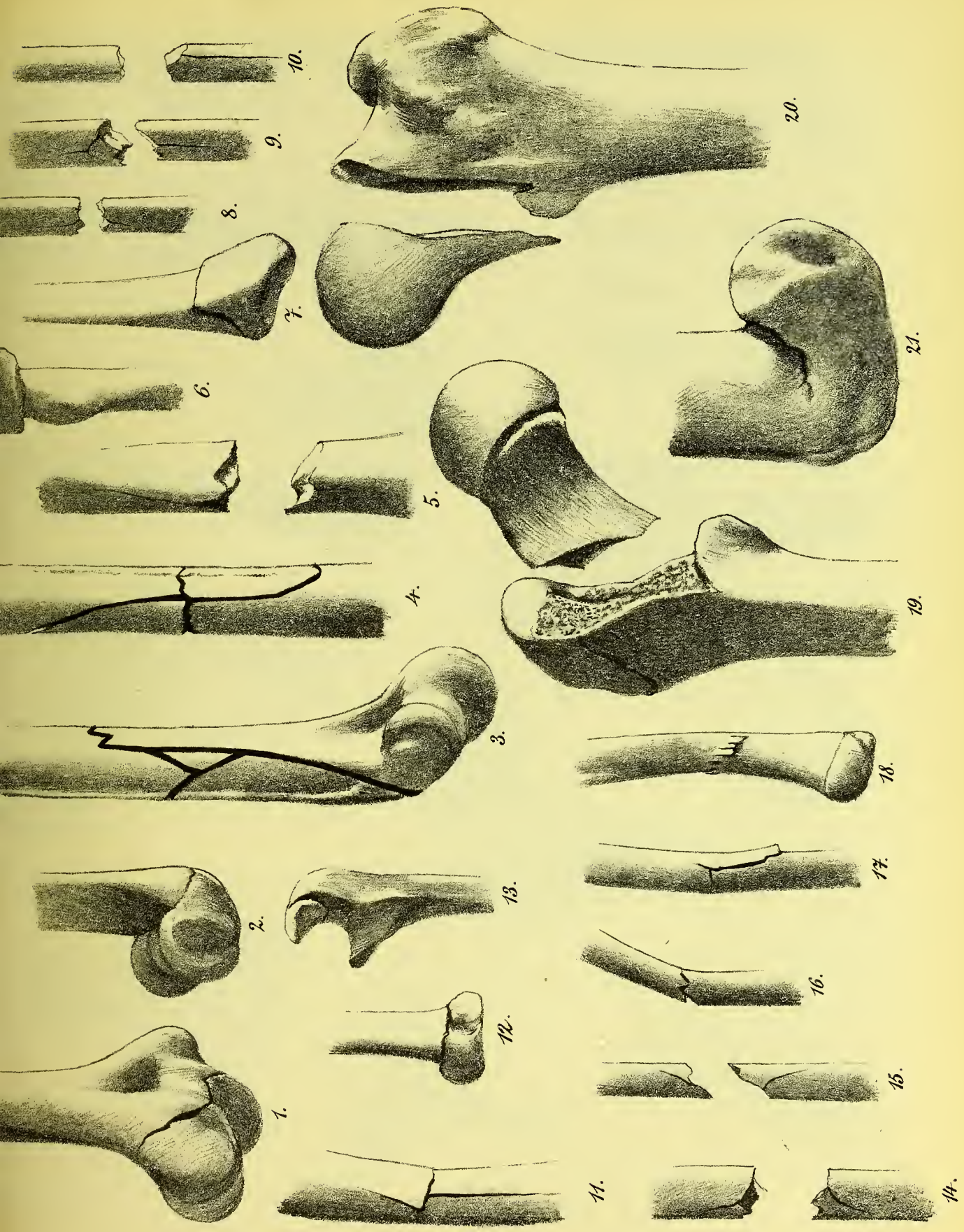
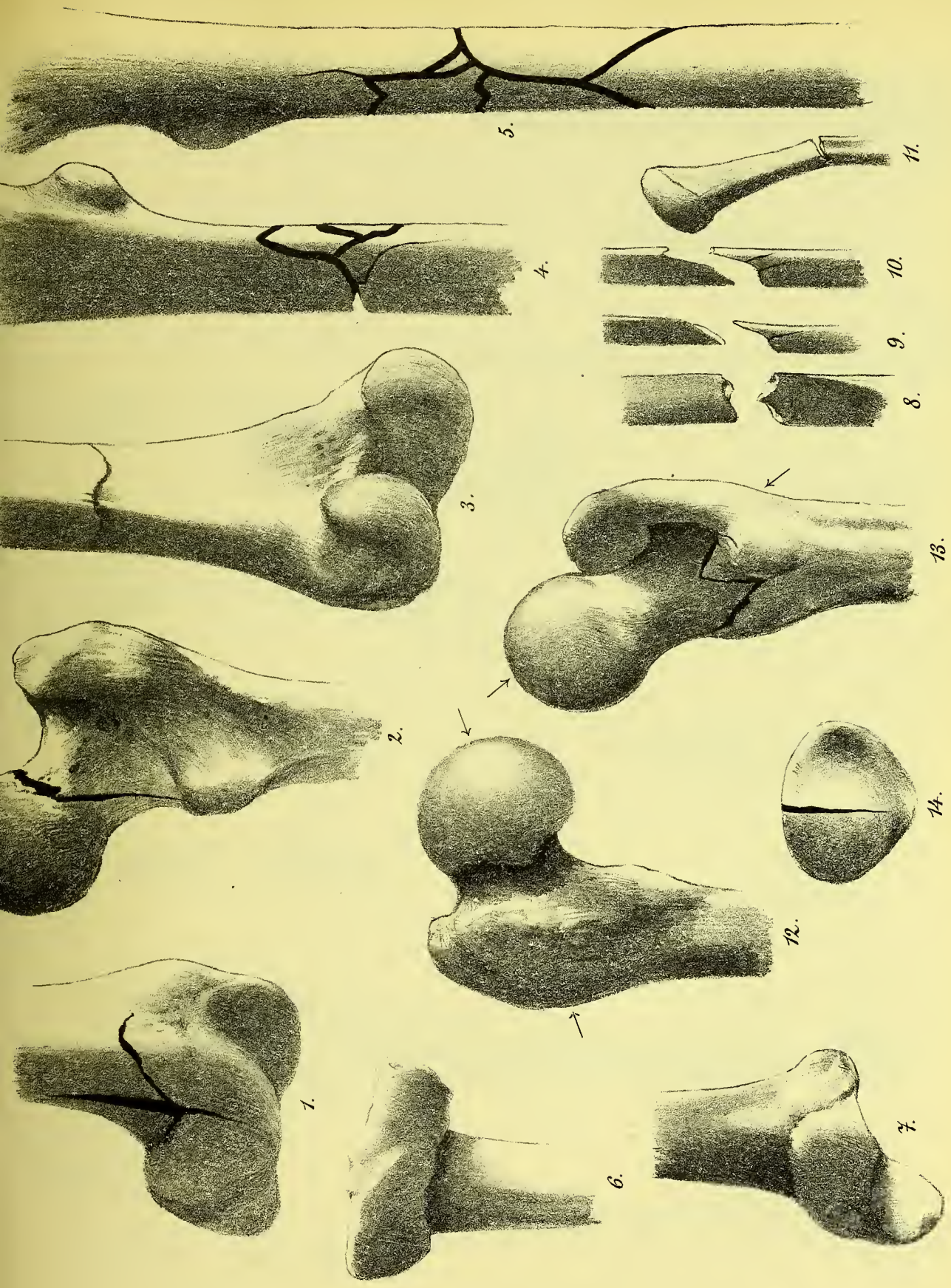
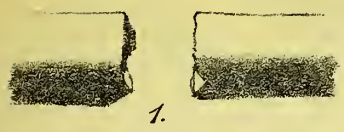


Fig. 2.


9.
12.
8.
11.
7.
6.
10.
5.
4.
3.
1.
2.


1.
2.
3.
4.
5.
6.
7.
8.
9.
10.
11.
12.
13.
14.
15.
16.
17.
18.
19.
20.
21.


5.
11.
4.
10.
9.
8.
3.
13.
2.
12.
14.
1.
6.
7.



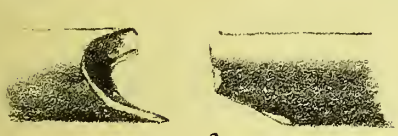
1.

9.

2.

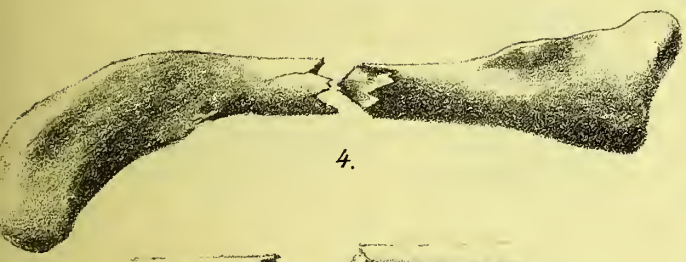
10.

11.



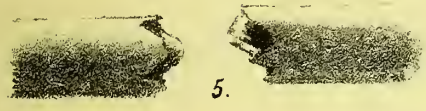
3.

12.



4.

13.

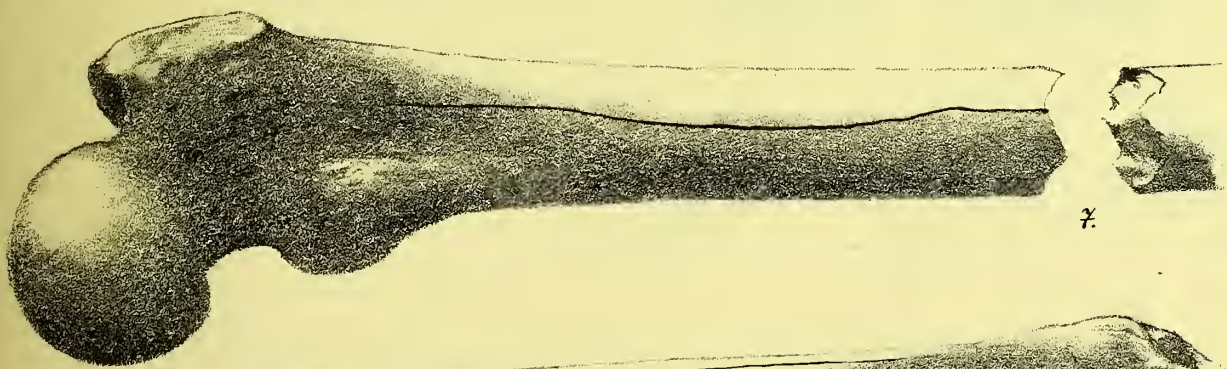


5.

14.

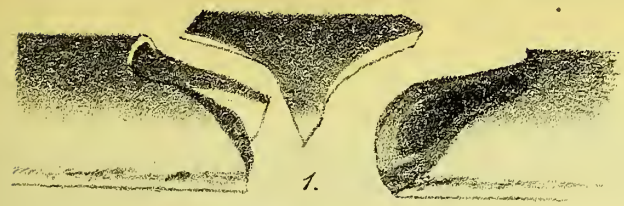
6.

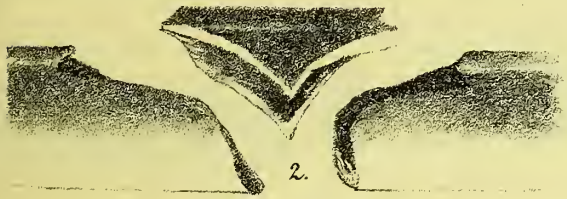
15.



7.

8.


1.

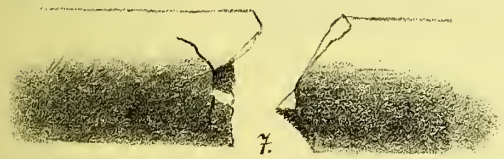

2.

3.

4.

5

6.

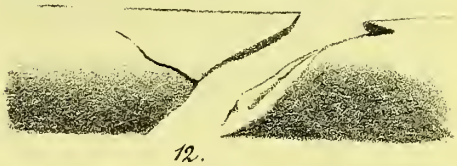

7.

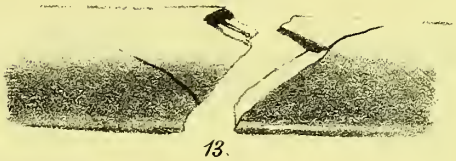
8.

9.

10.

11.

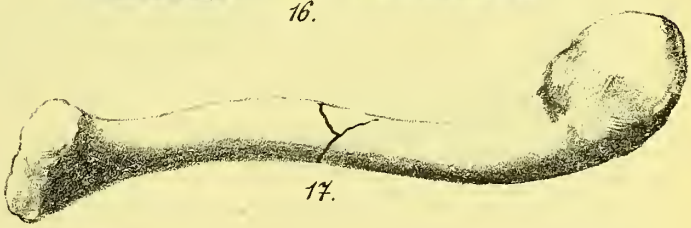

12.


13.

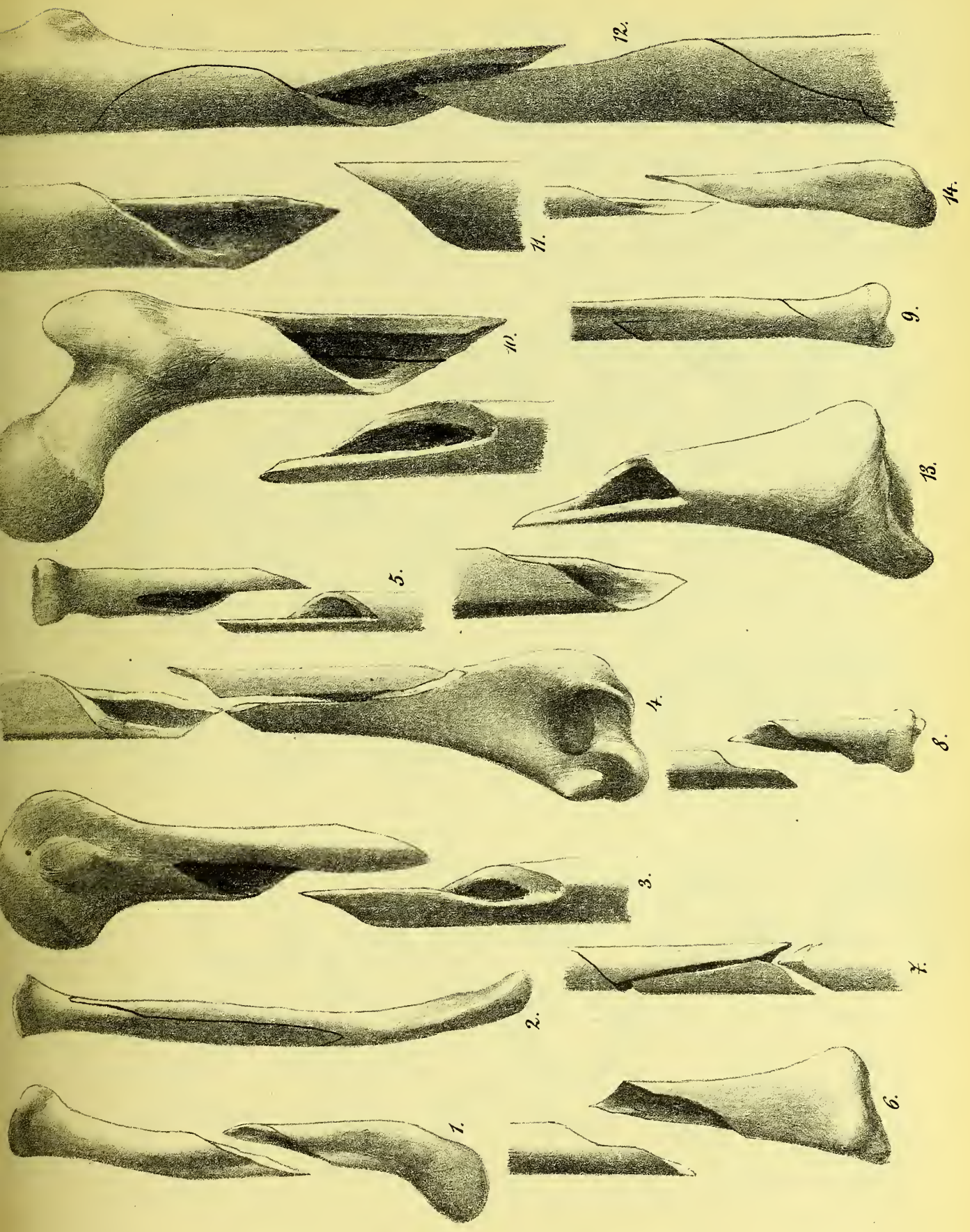
14.

15.

16.


17.

18.


12.
11.
14.
10.
9.
13.
5.
4.
8.
3.
7.
2.
6.
1.

18
24
32
32
38
49
75
78
18
18
20
24
32
51
74
82
5½
18
24
32
32
49
62
62
75
78
20
24
32
51
74
82
18
24
32
32
38
49
75
78
20
24
32
51
74
82